Magnetische Untersuchungen

a. Der Einfluß der stufenweisen Magnetisierung auf den magnetischen Endzustand in Kobalt.
b. Deformation infolge von Magnetisierung.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

der

Hohen Philosophischen Fakultät

der

Vereinigten Friedrichs-Universität Halle-Wittenberg

ACAD.
LUGD BAT.
BIBL.

vorgelegt von

Carl Asmus
aus Dramburg (Pom.)

Halle a. S.
Druck von W. Schade & Co. in Dramburg.
1910.

Referent: Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. **E. Dorn.**

Termin der mündlichen Prüfung: 9. Dezember 1909.

Herrn Prof. Dr. Berndt

in Dankbarkeit gewidmet.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41548101_0126

Der Einfluß der stufenweisen Magnetisierung auf den magnetischen Endzustand in Kobalt.

Inhaltsverzeichnis.

Seite

Einleitung 7
Versuchsanordnung und Apparate 8
Primärkreis 8
Sekundärkreis 10
Formeln zur Berechnung von H und B 11
Kobaltstab 13
Kobaltring 25
Nachwirkung 32
Ergebnis 33

Einleitung.

Schon von verschiedenen Beobachtern ist das Vorhandensein eines Einflusses der stufenweisen Magnetisierung auf den magnetischen Endzustand festgestellt worden. (Vergl. die ausführlichen Literaturangaben von Rücker: Beiträge zur Kenntnis der stetigen und stufenweisen Magnetisierung. Inaug.-Diss. Halle 1905). In eingehender und systematischer Weise haben Rücker und Reinicke*) in Halle diesen Stoff behandelt. Rücker untersuchte Eisen und Stahl, Reinicke Nickel. Beide bestätigten den schon verschiedentlich aufgestellten Satz, daß die Maximalinduktion mit der Größe der Stufen zunimmt. Ferner fand Rücker, daß sich bei der Magnetisierung von Eisen und Stahl bei hohen Werten der Permeabilität ein merklicher Einfluß der Stufenzahl zeigt, daß derselbe aber bei niederen Werten der Permeabilität gering ist. Reinicke dagegen erhielt beim Nickel keine einfache Beziehung zur Permeabilität, sondern gibt nur an, daß der Einfluß der Stufenzahl in der Nähe des Maximums der Permeabilität am größten ist.

Auf Veranlassung des Herrn Prof. Dr. Berndt habe ich im physikalischen Laboratorium des Polytechnikums zu Cöthen, in dem ich zur Zeit als Assistent tätig war, magnetische Messungen nach dieser Richtung hin mit Kobalt angestellt. Diese Untersuchungen erstreckten sich auf einen Stab und einen Ring, die nach der ballistischen Methode untersucht wurden. Beide unterwarf ich einem cyklischen Magnetisierungsprozeß, den ich durch die folgenden Zeichen andeute:

$$0 \uparrow 0 \downarrow 0 \uparrow 0 \downarrow \quad **)$$

*) Ballistische Messungen der magnetischen Induktion bei Nickelringen. Inaug.-Diss. Halle 1908.

**) Nach Rücker. Inaug.-Diss. Halle 1905. Seite 10.

Die nach oben gerichteten Pfeile mögen ein positives, die nach unten gerichteten ein negatives Maximum der magnetisierenden Feldstärke bedeuten. Nicht verwertet habe ich wegen der sogenannten molekularen Akkommodation die aus dem unterstrichenen Teil dieses Magnetisierungsprozesses sich ergebenden Werte.

Versuchsanordnung und Apparate.

In folgendem möge zunächst der Apparat beschrieben werden, mit dessen Hülfe es mir in einfacher Weise gelang, den Magnetisierungsstrom in untereinander ziemlich gleichen Stufen anwachsen und abnehmen zu lassen: Auf eine ca. 2,70 m lange, schmale Holzleiste wurde ein 1 mm starker Manganindraht gespannt, dessen beide Enden mit Klemmschrauben verbunden wurden (Fig. 1). Ein auf der Leiste verschiebbarer Klotz (Fig. 2) war oben mit einer Messingplatte und zwei starken, flachen Federn versehen. Zwischen letzteren und der Platte konnte der Manganindraht gleiten. Der so erhaltene Kontakt zwischen Draht und Schieber war vorzüglich.

Wenn man nun an den Manganindraht eine elektromotorische Kraft legt (Fig. 4) und zwischen die eine Endklemme und die Schieberklemme die Primärspule des zu untersuchenden Stabes oder Ringes schaltet, so erhält man in letzterer stärkere oder schwächere Ströme, jenachdem man den Schieber nach rechts oder links bewegt.

Diese einfache Anordnung konnte ich auch bei stärkeren Strömen verwenden, weil mein Primärkreis nur sehr kleinen Widerstand hatte.

Primärkreis.

In Fig. 5 bedeutet:

a den Manganindraht,

b den Schieber des soeben beschriebenen Apparates,

c eine Akkumulatorenbatterie von 20 Volt und 40 Ampère zulässiger Entladungsstromstärke,

d mehrere hintereinander geschaltete Kurbelwiderstände zur bequemen Einregulierung der Stromstärke,
e einen Quecksilberausschalter,
f einen Viernapfkommutator,
g ein Präzisionsmilliampèremeter (von Siemens und Halske) von 1 Ohm Widerstand, mit zwei Nebenschlüssen von $^1/_9$ und $^1/_{99}$ Ohm, mit dem sich Stromstärken bis 15 Ampère messen ließen,
P die Primärspule des Kobaltringes oder -Stabes,
h einen ausgespannten Manganindraht mit
i einem Schieber,
k ein Wechselstromampèremeter,
l einen Quecksilberausschalter,
m einen Regulierwiderstand,
n eine Wechselstrommaschine.

Vor Beginn eines jeden Versuches schob ich den Schieber (Fig. 5, b) fast ganz an die rechte Klemmschraube. Sodann stellte ich mit Hülfe der Widerstände (d) in dem Ampèremeter (g) auf die Maximalstromstärke, die ich gerade zu dem betreffenden Versuch brauchte, ein und markierte mir die Schieberstellung auf der Leiste durch einen Bleistiftstrich. — Der Schalter (l) war dabei natürlich wie auch beim eigentlichen Versuch geöffnet. — Dann verschob ich den Schieber nach links, bis ich die nächstniedrigere Stromstärke erhielt, entsprechend der Anzahl der gewünschten Stufen. Auch diese Stellung wurde markiert usw.

Um nun während des Versuches selber bequem auf die einzelnen Marken einstellen zu können, brachte ich auf der Leiste einen zweiten verschiebbaren Klotz an (Fig. 3), den ich jedesmal um einen Strich vorschob und dann festschraubte. Später habe ich denselben nicht mehr benutzt, sondern einfach durch Vorhalten der einen Hand die Verschiebung begrenzt, ein Verfahren, das namentlich bei starken Strömen sehr vorteilhaft war, da es ein schnelleres Arbeiten ermöglichte und ebenso genau war.

Um den Strom bei der letzten Stufe gleich Null werden zu lassen, schob ich den Schieber ans Ende der Leiste und schaltete

dann außerdem noch schnell den Strom aus. Kommutiert wurde letzterer durch den Kommutator (f).

Als Zuleitungsdrähte zu den Klemmen auf der Leiste verwandte ich dicke Kupferlitzen, um die Leiste bequem handhaben zu können.

Zum Entmagnetisieren benutzte ich einen Gleichstrom-Wechselstrom-Umformer von 4—6 PS. Die vorzüglichen Leitungsanlagen des Laboratoriums gestatteten es mir, die Maschine, die ich in einem entfernten Zimmer aufgestellt hatte, um Erschütterungen zu vermeiden, direkt mit meiner Primärspule zu verbinden, sodaß ich zum Entmagnetisieren alles in seiner Lage lassen konnte und nichts an der Schaltung zu ändern brauchte.

Die Maschine schloß ich an den Widerstand (m) und einen ca. 2 m langen, 1 mm starken Manganindraht (h). Den entmagnetisierenden Strom führte ich durch das Wechselstromampèremeter (k) und den Schalter (l) zur Primärspule. Durch langsames Verschieben des Schiebers (i) ließ ich den Strom allmählich bis fast auf Null abnehmen; dann erregte ich die Maschine langsam schwächer und schwächer und ließ sie schließlich auslaufen.

Trotz dieser vorzüglichen Methode war die Entmagnetisierung immer noch keine vollkommene, wie die Unsymmetrie der Kurven zur Abszisse zeigte.

Sekundärkreis.

Die Sekundärspule des Ringes (Fig. 6, S) war durch einen Viernapfkommutator (a) hintereinander verbunden mit einem Doppelmagnetinduktor (b), zwei Stöpselrheostaten (c) von insgesamt 110000 Ohm, einer Pohl'schen Wippe (d) und dem Galvanometer (e).

Das Galvanometer*) war auf einer in die Wand eingelassenen Schieferplatte aufgestellt. Zwecks guter Isolierung stand es auf einer Glasplatte, die ihrerseits auf einem Gummischlauche lag, der Erschütterungen einigermaßen dämpfte.

*) Drehspulgalvanometer von Edelmann.

Um mir ein schnelles Arbeiten zu ermöglichen, mußte ich darauf bedacht sein, das Galvanometer nach jedem Ausschlage möglichst bald in die Ruhelage zu bringen. Dies gelang mit Hülfe der Pohl'schen Wippe sehr gut, indem ich im rechten Augenblick das Galvanometer kurz schloß. In Fig. 6 ist diese Stellung der Wippe gezeichnet. Der Kommutator (a) diente dazu, die Ausschläge des Galvanometers immer nach derselben Seite erfolgen zu lassen.

Sämtliche Apparate des Sekundärkreises waren durch Paraffinplatten von den Tischen isoliert.

Der Abstand der Skala vom Spiegel betrug 4 m. Zum Ablesen benutzte ich ein Fernrohr von Steinheil mit achtundvierzigfacher Vergrößerung.

Die Drähte wurden hoch durch das Zimmer, von den tragenden Schnüren durch Seidenband isoliert, zum Galvanometer geführt.

Formeln zur Berechnung von H und B.

Die Feldstärke in einem gleichmäßigen Felde, wie man es bei Ringen nahezu erhält, ist

$$H = \frac{4}{10} \cdot \pi \cdot n \cdot i,$$

wo i den in der Spule fließenden Strom in Ampère, n die Windungszahl auf 1 cm bedeutet. Letztere erhält man, indem man die gesamten Primärwindungen N durch die Länge des Leitkreises, dessen Radius r sei, dividiert. Infolgedessen geht obige Formel über in

$$H = \frac{0{,}2\ N}{r}\ i$$

Die mittlere Feldstärke, mit der ein langgestrecktes Solenoid auf einen Zylinder wirkt, berechnet man nach der Formel:

$$H = \frac{4 \cdot \pi \cdot n \cdot i}{10} \left| \frac{1}{l - 2a} \left(\sqrt{r^2 + (l-a)^2} - \sqrt{r^2 + a^2} \right) \right|$$

n = Windungszahl auf 1 cm,

i = Stromstärke in Ampère,

l = Länge der Magnetisierungsspule,
a = Abstand des Stabendes vom Spulenende.

Die magnetische Induktion B berechnete ich nach der Formel:

$$B = \frac{Cb \cdot \alpha \cdot w \cdot 10^{\wedge}}{n_s \cdot q_1} - H \frac{q_2}{q_1}$$

Darin bedeutet

α die Ausschläge des Galvanometers,
w den Gesamtwiderstand des Sekundärkreises in Ohm,
n_s die Anzahl der Sekundärwindungen,
q_1 den Querschnitt der ferromagnetischen Substanz,
q_2 den Querschnitt des von der Sekundärspule eingeschlossenen Interferrikums,
H die Feldstärke in Gauß,
Cb den ballistischen Reduktionsfaktor des Galvanometers, den man nach der Formel berechnet:

$$Cb = C \cdot \frac{\tau}{\pi} \cdot k^{\frac{1}{\pi} \operatorname{arc\,tg} \frac{\pi}{\lambda}}$$

(C = statischer Reduktionsfaktor des Galvanometers; τ = Schwingungsdauer ohne Dämpfung; k = Dämpfungsverhältnis; λ = logarithmisches Dekrement).

Der Faktor $10^{\wedge}$ kommt aus folgendem Grunde in die Gleichung: Da sämtliche Größen in C.-G.-S. ausgedrückt werden müssen, muß man w mit 10^{9}, Cb, der aus dem statischen Reduktionsfaktor, den man in cm/Amp. mißt, berechnet wird, mit 0,1 multiplizieren.

$$10^{9} \cdot 0{,}1 = 10^{\wedge}$$

Den statischen Reduktionsfaktor des Galvanometers habe ich sehr häufig gemessen und mit den Ausschlägen des Doppelmagnetinduktors, der im Sekundärkreis lag, verglichen. Die Empfindlichkeit änderte sich nur sehr wenig, da das Zimmer, in dem ich arbeitete, ungestört lag und unter mechanischen Erschütterungen wenig zu leiden hatte. Ich kontrollierte sie vor und nach jedem Versuch mit Hülfe des Magnetinduktors, dessen Ausschläge bei einem Ballastwiderstand von 5000 Ohm etwa 36 cm be-

trugen. Da ich immer mit derselben Empfindlichkeit arbeitete, mußte ich bei großen Feldstärken großen Widerstand in den Sekundärkreis legen. Ich benutzte nur Ausschläge des Galv. von maximal etwa 30 cm, um mit genügender Proportionalität rechnen zu können. Ich habe infolgedessen das Dämpfungsverhältnis k für jeden Widerstand des Sekundärkreises mehrmals bestimmen müssen. Die Werte für $k^{\frac{1}{\pi} \operatorname{arc\,tg} \frac{\pi}{\lambda}}$ entnahm ich der Tabelle 29 in Kohlrausch, Lehrbuch der praktischen Physik. Den Widerstand des Sekundärkreises habe ich nie kleiner als 2500 Ohm gemacht, da das Galvanometer sonst aperiodisch wurde. Infolgedessen konnte ich bei den schwächsten angewandten Feldstärken nur Versuche mit wenig Stufen machen, da sonst die Empfindlichkeit des Galvanometers nicht ausreichte. Angewendet habe ich die Stufenzahlen 1, 2, 3, 4, 6, 12, 24. Bei stärkeren Feldern habe ich jedoch die zwei- und vierstufigen Versuche ausgelassen.

Kobaltstab.

Meinen Kobaltstab bezog ich von den „Vereinigten Deutschen Nickelwerken" zu Schwerte in Westfalen und zwar als einen Streifen von 4 mm starkem gewalztem Blech. Derselbe wurde von dem Mechaniker des physikalischen Laboratoriums möglichst gleichmäßig, zylindrisch abgedreht.

Die Dimensionen wurden mit Hülfe des Schraubenmikrometers, der Teilmaschine und durch Wägen festgestellt.

	Länge	= 31,101 cm
	Dicke	= 0,2941 cm
Querschnitt	=	0,067913 (aus Dicke)
„	=	0,067911 (aus Wägung u. Länge)
Mittel	=	0,067912 qcm
	Absolutgewicht	= 18,5171 g
	spez. Gewicht	= 8,7676

Die Primärspule war in einer Länge von 49,6 cm auf eine 1,11 cm dicke Glasröhre gewickelt. Sie hatte 7 Lagen.

Die beiden untersten bestanden aus 1 mm starkem, zweimal mit Seide umsponnenen Kupferdraht (17,26 Windungen auf 1 cm). Die darüber gewickelten 5 Lagen bestanden aus 0,9 mm starkem, gewachstem, mit Baumwolle umsponnenem Draht (30,11 Windungen auf 1 cm). Der äußere Radius der beiden ersten Lagen betrug 0,76 cm, der äußere Radius der sämtlichen 7 Lagen 1,47 cm.

Für die Versuche mit Feldstärken bis zu 162,7 Gauß benutzte ich nur die beiden untersten Lagen. Zu den folgenden beiden höheren Feldstärken (208,2 u. 297,7) sämtliche 7 Lagen (also $30{,}11 + 17{,}26 = 47{,}37$ Windungen auf 1 cm).

Die Sekundärspulen — ich benutzte deren zwei — waren auf dünne Papierhülsen gewickelt, die gerade auf den Stab paßten. Die erste war 5,3 cm lang und hatte bei einem äußeren Radius von 0,345 cm 1000 Windungen. Die Länge der zweiten betrug 6,5 cm, der Radius 0,363 cm, und die Windungszahl war 4145. Die Windungen wurden mit Hülfe eines Zählwerkes, die Radien mit der Schublehre festgestellt. Zu der ersten Spule verwandte ich 0,25 mm, zu der zweiten 0,15 mm starken Draht. Beide wurden möglichst gleichmäßig gewickelt und schellackiert. Der Stab mit der daraufgeschobenen Spule wurde in der Glasröhre der Primärspule durch Korkstückchen fixiert.

Die Primärspule befand sich in einem kleinen Trog aus Zinkblech (Fig. 7), der mit Petroleum gefüllt war. Dieser stand in einem größeren Troge, durch den ich aus der Wasserleitung einen Strom kaltes Wasser leiten konnte, um einer Erhitzung der Primärspule und des Stabes vorzubeugen.

Die Beobachtungen erfolgten mit einem ballistischen Drehspulgalvanometer von Edelmann. Der statische Reduktionsfaktor C betrug bei dem gewählten Skalenabstande von 4 m $5{,}5014 \cdot 10^{-7}$ Amp./cm, die Schwingungsdauer T bei geöffnetem Sekundärkreise 11,696 Sekunden. Die Dämpfung durch Luftreibung und Torsion des Aufhängefadens war zu gering ($k = 1{,}017$), um einen merklichen Einfluß auf die Schwingungsdauer auszuüben: Man erhält für $k = 1{,}017$ $T : \tau = 1{,}0000$ (Kohlrausch, Lehrb. d. prkt. Physik Tab. 29).

Es ist also $\tau = T$.

Der ballistische Reduktionsfaktor war für den kleinsten von mir benutzten Sekundärwiderstand (ca. 2500 Ohm; k = 4,700)

$$3{,}544 \cdot 10^{-8} \text{ Coul./cm},$$

für den größten (ca. 18500 Ohm; k = 1,101)

$$2{,}255 \cdot 10^{-8} \text{ Coul./cm}.$$

Die als Ballastwiderstände verwendeten Rheostaten hatten Manganinspulen. Der Temperaturkoeffizient des Manganins ist für die verschiedenen Sorten recht verschieden. Als Maximum wird gewöhnlich 0,00003 angegeben. Nehmen wir einmal diese Zahl an, so erhalten wir selbst bei 40000 Ohm und 1° Temperaturunterschied nur + 1 Ohm. Da nun aber der Temperaturkoeffizient auch ebensogut zehnmal so klein sein kann, habe ich ihn bei meinen Temperaturkorrektionen nicht berücksichtigt und nur die Widerstandsänderungen der kupfernen Leiter im Sekundärkreis in Betracht gezogen (Temp.-Koeff. 0,0041).

Die Feldstärke, die wir in unserer Primärspule erhalten, ist

$$H = \frac{4 \cdot \pi \cdot n \cdot i}{10} \left| \frac{1}{l - 2a} \left(\sqrt{r^2 + (l - a^2)} - \sqrt{r^2 + a^2} \right) \right|$$

Setzen wir in den Ausdruck in der eckigen Klammer unsere Werte ein, so erhalten wir

$$\frac{1}{49{,}60 - 18{,}50} \left(\sqrt{1{,}02^2 + (49{,}60 - 9{,}25)^2} - \sqrt{1{,}02^2 + 9{,}25^2} \right)$$

$$= \frac{3105}{3110} = 0{,}9984.$$

Da der hierdurch bedingte Unterschied von $\frac{4 \cdot \pi \cdot n \cdot i}{10}$ nur etwa $^1/_6$ % beträgt, brauchen wir ihn nicht weiter zu berücksichtigen. Untersuchen aber müssen wir noch, um wieviel die entmagnetisierende Intensität der Stabenden das Feld verkleinert.

Nennen wir das nicht korrigierte Feld H^1, so ist das wirkliche Feld

$$H = H^1 - P \cdot J,$$

wenn J die Intensität der Magnetisierung, P den Entmagneti-

sierungsfaktor bedeutet. Setzen wir für J in die Formel $\frac{B - H}{4 \cdot \pi}$ oder, da bei großer Permeabilität B im Verhältnis zu H sehr groß ist, einfach $\frac{B}{4 \cdot \pi}$, so erhalten wir annäherungsweise

$$H = H^1 - \frac{P}{4 \cdot \pi} \cdot B.$$

Nach den Berechnungen von du Bois*) ist der Entmagnetisierungsfaktor für Zylinder, deren Länge das Hundertfache ihrer Dicke beträgt,

$$P = 0{,}0045 \text{ und } \frac{P}{4 \cdot \pi} = 0{,}00036.$$

Es ergibt sich also

$$H = H^1 - 0{,}00036\ B.$$

Die folgende Tabelle enthält in der mittleren Spalte die für die verschiedenen Feldstärken berechneten Werte für $0{,}00036 \cdot B_{max}$, in der rechten die hierdurch sich ergebenden Unterschiede vom unkorrigierten H in Prozent.

Tabelle 1.

H unkorrigiert	$0{,}00036 \cdot B_{max}$**)	Unterschiede in %
5,421	0,034	0,63
10,84	0,074	0,68
21,69	0,17	0,78
54,21	0,68	1,26
108,4	1,89	1,75
162,7	2,62	1,61
208,3	2,95	1,42
297,7	3,63	1,21

*) Ewing. Magnetische Induktion in Eisen und verwandten Metallen. Deutsche Ausgabe v. Holborn u. Lindeck 1892 Seite 331.

**) Die Werte für B_{max} wurden den Tabellen 2, 3 sowie den übrigen nicht aufgeführten Tabellen entnommen.

Ein bequemes Mittel, die durch die entmagnetisierende Intensität der Stabenden hervorgerufene Verminderung des magnetischen Feldes und dadurch der sämtlichen anderen Größen graphisch darzustellen, bietet die von Lord Rayleigh angegebene Scheerung. Meine Kurven zu scheeren habe ich jedoch unterlassen, da die Unterschiede bei den von mir gewählten Größenverhältnissen nur außerordentlich geringe sind.

In der Formel

$$B = \frac{Cb \cdot \alpha \cdot 10^8 \cdot w}{n_s \cdot q_1} - H \frac{q_2}{q_1}$$

ist $\frac{q_2}{q_1}$ für die kleine Sekundärspule 4,507, für die große 5,097. Man kann daher diese Korrektion an B nicht unberücksichtigt lassen.

Der Gang der Versuche gestaltete sich nun folgendermaßen: Nachdem ich die Maximalfeldstärke und die Stufen einreguliert hatte, entmagnetisierte ich. Kurz vor Anfang des eigentlichen Versuches notierte ich die Ausschläge, die ich bei einem Ballastwiderstande von 5000 Ohm mit dem Magnetinduktor erhielt. Dann kam der Versuch, und zum Schluß wurde wieder die Empfindlichkeit mit dem Magnetinduktor geprüft.

Ich notierte gewöhnlich drei Ausschläge vor und drei nach dem Versuch. Aus den in diesen beiden Gruppen erhaltenen Mittelwerten nahm ich wieder das Mittel. Uebrigens waren diese 6 Ausschläge fast vollkommen gleich.

In Rechnung gesetzt wurden die hierdurch konstatierten Empfindlichkeitsänderungen folgendermaßen: Jedesmal, wenn ich die statische Empfindlichkeit des Galvanometers nach der Abzweigmethode gemessen hatte, bestimmte ich auch eine Reihe von Ausschlägen mit dem Magnetinduktor. Aus diesen sämtlichen Ausschlägen nahm ich das Mittel. Mit dem Quotienten aus dieser Zahl und dem bei einem jeden Versuche erhaltenen Ausschlage des Magnetinduktors (Mittel) wurden alle Werte des betreffenden Versuches multipliziert.

Das Resultat der sämtlichen Versuche mit dem Kobaltstabe habe ich in Tabellen zusammengestellt. Es würde zu weit führen,

wollte ich sie alle folgen lassen. Ich begnüge mich daher damit, nur zwei (Tab. 2 u. 3) hier wiederzugeben. Im übrigen verweise ich auf die Tabellen 4—11. Bei den Versuchen mit 24 Stufen habe ich nur die Werte für B_{max} und die Remanenz berechnet.

Tabelle 2. $H_{max} = 10{,}84$.

4 Stufen		3 Stufen		2 Stufen		1 Stufe	
B	H	B	H	B	H	B	H
— 201,9	— 10,84	201,1	— 10,84	— 203,8	— 10,84	— 206,4	— 10,84
— 156,8	*) 8,132	143,2	7,157				
— 112,6	5,421			— 153,7	— 5,421		
— 65,73	2,711	76,89	— 4,368				
— 16,42	0,000	— 16,11	0,000	— 16,12	0,000	— 17,05	0,00
Kommutation der Stromrichtung.							
+ 33,85	2,711	+ 47,85	4,368				
+ 86,60	— 5,421			+ 89,00	+ 5,421		
+ 140,9	8,132	+ 125,5	+ 7,157				+
+ 198,8	10,84	+ 200,5	10,84	+ 202,2	10,84	+ 204,8	10,84
+ 154,5	8,132	+ 142,6	7,157				
+ 110,3	+ 5,421			+ 111,3	+ 5,421		
+ 64,15	2,711	+ 75,33	+ 4,368				+
+ 14,52	0,000	+ 15,16	0,000	+ 17,38	0,000	+ 17,68	0,00
Kommutation der Stromrichtung.							
— 38,27	2,711	— 50,37	4,368				
— 89,20	— 5,421			— 90,0	— 5,421		
— 144,4	8,132	— 126,2	— 7,157				—
— 201,6	10,84	201,1	10,84	— 203,8	10,84	206,7	10,84

Fig. 10.

*) Die — oder + in den Rubriken für H beziehen sich auf alle Zahlen.

Tabelle 3.

H_{max} = ca. 108.

24 Stufen		12 Stufen		6 Stufen		3 Stufen		1 Stufe	
B	H	B	H	B	H	B	H	B	H
— 4905	— 108,4	— 5089	— 104,1	— 5034	— 108,3	— 5188	— 110,2	— 5142	— 108,8
		— 4951	95,21						
		— 4813	86,76	— 4737	89,35				
		— 4654	78,07						
		4495	69,39	— 4393	71,78	— 4531	73,74		
		— 4309	60,73						
		4122	52,05	— 3954	53,34				
		3907	43,37						
		3682	34,69	— 3519	35,79	— 3783	37,95		
		— 3435	26,02						
		— 3179	17,35	— 3007	18,00				
		— 2888	8,676						
2336	0,00	2589	0,000	2388	0,00	2520	0,00	2541	0,00
Kommutation der Stromrichtung.									
		— 2189	8,676						
		— 1725	17,35	— 1406	18,00				
		1194	26,02						
		— 505,0	34,69	— 112,3	35,99	— 166,2	36,86		
		— 12,7	43,37						
	+	+ 953,0	+ 51,62	+ 1479	+ 54,00		+		+
		+ 1911	+ 59,64						
		+ 2578	68,31	+ 3264	71,78	+ 3881	74,16		
		+ 3266	77,64						
		+ 3657	83,51	+ 4435	89,78				
		+ 4238	93,91						
+ 5124	108,4	+ 4701	104,1	+ 5309	108,0	+ 5382	110,2	+ 5308	107,4

		+ 4548	94,99						
		+ 4389	86,76	+ 5019	89,13				
		+ 4259	79,38						
		+ 4048	68,53	+ 4687	71,57	+ 4728	73,74		
		+ 3877	60,73						
	+	+ 3686	+ 52,26	+ 4274	+ 54,00		+		+
		+ 3496	+ 43,81						
		+ 3276	35,14	+ 3840	35,56	+ 3864	36,86		
		+ 3004	25,80						
		+ 2766	17,35	+ 3326	18,00				
		+ 2480	8,676						
+ 2568	0,00	+ 2165	0,000	+ 2708	0,00	+ 2707	0,00	+ 2679	0,00

Kommutation der Stromrichtung.

		+ 1753	8,676						
		+ 1274	17,57	+ 1757	18,22				
		+ 747,9	26,02						
		+ 43,7	34,91	+ 474,8	35,99	+ 335,2	37,09		
		— 410,6	43,37						
	+	— 1394	— 52,05	— 1133	— 53,79		—		—
		— 2374	60,73						
		— 3170	69,39	— 2934	71,78	— 3218	74,16		
		— 3779	77,64						
		— 4326	86,76	— 4101	89,78				
		— 4796	95,43						
— 4924	108,4	— 5214	104,1	— 4966	108,04	— 5196	110,4	— 5174	107,6

Fig. 13. Fig. 14.

Die Tabellen liefern je drei Werte für die maximale Induktion, nämlich einen positiven und zwei negative. Aus den beiden letzteren, die gewöhnlich sehr wenig von einander abwichen, wurde das Mittel und aus diesem und dem positiven Wert das Hauptmittel genommen. Für die Remanenz erhält man je zwei Werte, aus denen ebenfalls das Mittel genommen wurde.

Wenn ich nun in folgendem einfach von B_{max} und B_r, der Remanenz, spreche, so sind immer die durch diese Mittelbildung gewonnenen Zahlen gemeint, die außerdem noch, wenn die Maximalstromstärke nicht ganz konstant geblieben war, in dieser Beziehung korrigiert wurden. (Die erforderliche Maximalfeldstärke sei H_{max}, die abweichende H'_{max}, dann wurden die bei H'_{max} erhaltenen B_{max} und B_r mit dem Faktor $\frac{H_{max}}{H'_{max}}$ multipliziert.)

In den folgenden Tabellen (4—11) habe ich die prozentualen Unterschiede angegeben, um die die betreffenden B_{max} und B_r von den durch den einstufigen Versuch gewonnenen Werten abweichen. In Tabelle 11 rechnete ich, da sich bei der hohen Stromstärke kein einwandfreier einstufiger Versuch machen ließ, die Unterschiede vom zweistufigen.

Es bedeutet ein — vor der Zahl eine Abnahme, ein + eine Zunahme um die betreffenden Prozente. Der bei jeder Tabelle angegebene Wert für die Permeabilität μ_{max} wurde aus dem betreffenden einstufigen Versuch berechnet.

Tabelle 4.

$H_{max} = 5{,}421$; $\mu_{max} = 17{,}23$.

Stufen	B_{max}	% Diff.	Remanenz	% Diff.
1	93,4		4,421	
2	92,3	— 1,18	3,945	— 10,76

Tabelle 5.

$H_{max} = 10{,}84$; $\mu_{max} = 18{,}97$.

1	205,7		17,37	
2	203,0	— 1,31	16,75	— 3,57
3	200,8	— 2,38	15,64	— 9,96
4	200,3	— 2,62	15,47	— 10,94

Tabelle 6.

$H_{max} = 21{,}69$; $\mu_{max} = 22{,}80$.

Stufen	B_{max}	% Diff.	Remanenz	% Diff.
1	494,4		64,15	
2	490,2	— 0,85	63,51	— 1,00
3	488,0	— 1,29	62,23	— 2,99
4	487,2	— 1,46	69,26	— 7,97

Tabelle 7.

$H_{max} = 54{,}21$; $\mu_{max} = 34{,}97$.

1	1896		628,4	
3	1954	+ 3,06	658,8	+ 4,84
6	1911	+ 0,79	634,8	+ 1,02
12	1948	+ 2,74	631,6	+ 0,51
24	1894	— 0,11	622,3	— 0,97

Tabelle 8.

$H_{max} = 108{,}4$; $\mu_{max} = 48{,}50$.

1	5258		2622	
3	5200	— 1,10	2571	— 1,95
6	5157	— 2,05	2524	— 3,74
12	5133	— 2,38	2477	— 5,53
24	5019	— 4,54	2452	— 6,48

Tabelle 9.

$H_{max} = 162{,}7$; $\mu_{max} = 44{,}78$.

1	7285		3629	
3	7144	— 1,94	3525	— 2,86
6	7188	— 1,33	3561	— 1,87
12	7180	— 1,44	3519	— 3,03
24	7178	— 1,47	3538	— 2,51

Tabelle 10.

$H_{max} = 208{,}3$; $\mu_{max} = 39{,}33$.

Stufen	B_{max}	% Diff.	Remanenz	% Diff.
1	8193		4036	
3	8066	— 1,23	3914	— 3,02
6	8116	— 0,94	3906	— 3,22
12	8072	— 1,48	3914	— 3,02

Tabelle 11.

$H_{max} = 297{,}7$; $\mu_{max} = 33{,}86$.

2	10081		4402	
3	9928	— 1,52	4613	+ 4,79
6	9768	— 3,11	4429	+ 0,61
12	9611	— 4,67	4453	+ 1,16

Aus diesen Tabellen ergibt sich, daß in allen Feldern die Größe der Stufen auf die maximale Induktion und in noch höherem Maße auf die Remanenz von Einfluß ist: Beide nehmen mit der Größe der Stufen zu. Selbst Tabelle 7 und 11 bestätigen dies Resultat; denn wenn wir in beiden den ersten Versuch weglassen, sehen wir, daß auch hier das B_{max} und das B_r bei größerer Anzahl der Stufen abnimmt.

Ferner zeigt sich, daß dieser Einfluß in schwachen Feldern am größten, in stärkeren kleiner und in den stärksten wieder größer ist. Eine einfache Beziehung zur Permeabilität ergibt sich nicht. (Vergl. die Kurven Fig. 24 u. 25).

Auf die Koërzitivkraft scheint die Anzahl der Stufen ohne Einfluß zu sein. Leider liegen bei meinen Versuchen die betreffenden maßgebenden Punkte etwas weit auseinander, sodaß ich es nicht mit voller Bestimmtheit behaupten kann.

Die Kurven — ich habe sämtliche gezeichnet — zeigen im allgemeinen einen sehr regelmäßigen Verlauf. Ich gebe in Fig. 9—17 für jede Feldstärke je eine wieder (obere Hälfte).

Sonderbarerweise fallen in der Kurve, die Fig. 12 halb wiedergibt, vier zu einander fast symmetrisch liegende Punkte aus der

Reihe und ebenso bei dem zugehörigen zwölfstufigen Versuch. Auch bei Fig. 13 liegen zwei Punkte in der Nähe der Abszissenachse außerhalb der Kurve, bei dem sechsstufigen Versuch, Fig. 14, jedoch nicht. Einen Grund hierfür konnte ich nicht finden.

Kobaltring.

Das Material zu meinem Ring bezog ich von Merck—Darmstadt in Würfeln. Das Kobalt wurde zu einem Ringe gegossen; diesen ließ ich von dem Mechaniker des Laboratoriums möglichst gleichmäßig abdrehen. Nach Feststellung seiner Dimensionen wurde er leicht schellackiert, mit einer Lage von 0,25 mm starkem, mit Seide umsponnenen Kupferdraht, der Sekundärspule, bewickelt und wieder schellackiert. Nachdem die Anzahl der Windungen durch wiederholtes Auszählen bestimmt war, wurde eine Lage von technischem Isolierband, das schellackiert war, darüber gewickelt und darauf in zwei Lagen die Primärspule aus 1 mm starkem, zweimal mit Seide umsponnenen Draht.

Der Ring hing, von vier Fäden gehalten, in einem Glasgefäß, das mit Petroleum gefüllt war (Fig. 8). Der Deckel des Gefäßes bestand aus Holz, die Klemmen waren durch Ebonitpfropfen isoliert. Die Isolation der Primärspule von der sekundären war vorzüglich: Verband ich das Galvanometer hintereinander mit einer Klemme der Primärspule, einem Akkumulator und einer Klemme der Sekundärspule, so erhielt ich einen Ausschlag von 5—10 mm im Fernrohr. Es bedeutet dies bei einer Empfindlichkeit des Galvanometers von $5 \cdot 10^{-9}$ Amp./cm einen Isolationswiderstand von etwa $5 \cdot 10^{8}$ Ohm.

Die Dimensionen des Ringes, die ich mit Hülfe der Teilmaschine, des Schraubenmikrometers und durch Wägen feststellte, sind folgende:

Durchmesser des Leitkreises $= \frac{9{,}609 + 8{,}023}{2}$. $= 8{,}816$ cm;

Dicke, mit Teilmaschine in der Ringebene gemessen . . . . . $= 0{,}7956$ cm;

Dicke, senkrecht zur Ringebene mit Schraubenmikrometer gemessen . . . . . $= 0{,}7906$ cm;

Dicke (Mittel) $= 0{,}7931$ cm;

Querschnitt (aus Dicke) . . . . . = 0,4940 qcm;
„ (Wäg. u. Leitkreis) . . . . . = 0,4926;
Querschnitt (Mittel) = 0,4933 qcm;
Absolutgewicht . . . . . = 108,7221 g;
spez. Gewicht . . . . . = 8,0053.*)

Die Beobachtungen an dem Ring stellte ich später an als die an dem Stabe. Das Galvanometer war inzwischen von seinem Platze genommen, arretiert und anderweitig verwendet worden. Die Empfindlichkeitsfaktoren hatten sich daher verändert. In folgendem gebe ich die neuen Daten an, die ich erhielt:

die statische Empfindlichkeit war $C = 5{,}7062 \cdot 10^{-9}$ cm/Amp.;
$T = \tau = 11{,}360$ Sekunden;
der ballistische Reduktionsfaktor war für den kleinsten benutzten Sekundärwiderstand (etwa 3500 Ohm; k = 2,750) $3{,}095 \cdot 10^{-8}$ Coul./cm,
für den größten (etwa 40500 Ohm; k = 1,106) $2{,}168 \cdot 10^{-8}$ Coul./cm.

Da bei dem Ring die Sekundärspule nur eine Lage hatte und dicht auf den Ring gewickelt war, wird in der Formel

$$B = \frac{Cb \cdot 10^8 \cdot w \cdot \alpha}{n_s \cdot q_1} - H \cdot \frac{q_2}{q_1}$$

der Ausdruck $H \cdot \frac{q_2}{q_1}$ fast gleich Null. Wir können ihn daher bei der Berechnung weglassen.

Im übrigen war die Schaltung und alles andere wie beim Versuch mit dem Stabe.

Fig. 24 und 25 zeigen, daß die Permeabilität und Suszeptibilität beim Ringe bedeutend größer sind, als beim Stabe. Es liegt dies wohl daran, daß der Ring gegossen und daher weicher, der Stab aber aus gewalztem Blech gefertigt und daher härter war; denn auch die spezifischen Gewichte weichen bedeutend von einander ab.**)

*) Siehe Seite 13.

**) Die Abweichung ist zu groß, als daß man sie allein auf Kosten der Härte setzen dürfte. Es müssen demnach einige Blasen in dem Ringe vorhanden sein.

Das Resultat der sämtlichen Versuche mit dem Ringe habe ich ebenso wie beim Stabe in Tabellen zusammengestellt. Ich gebe von diesen hier nur zwei (Tab. 12 u. 13) wieder und verweise im übrigen auf Tabelle 14—19. In Fig. 18—23 gebe ich für jede Feldstärke je eine Kurve (obere Hälfte) wieder.

Tabelle 12.

$H_{max} = 4{,}673.$

6 Stufen		3 Stufen		1 Stufe	
B	H	B	H	B	H
— 782,7	— 4,673	— 781,6	— 4,673	776,7	— 4,673
— 705,1	3,739				
— 631,5	2,973	— 634,1	2,990		
— 548,4	2,244				
— 457,0	1,496	— 449,1	1,403		
— 352,8	0,748				
— 244,0	0,000	— 248,3	0,000	— 234,4	0,000
Kommutation der Stromrichtung.					
120,8	0,748				
+ 27,5	1,496	+ 000,0	1,403		
+ 191,3	2,262				
+ 364,0	2,990	+ 364,9	+ 3,028		+
+ 535,5	3,739				
+ 747,4	4,673	+ 755,9	4,673	+ 782,1	4,673
+ 671,0	3,739				
+ 597,1	2,973	+ 605,6	2,990		
+ 517,0	+ 2,244				
+ 425,3	1,496	+ 427,7	+ 1,440		+
+ 317,9	0,729				
+ 209,3	0,000	+ 221,8	0,000	+ 236,4	0,000
Kommutation der Stromrichtung.					
+ 89,1	0,729				
65,3	1,496	— 40,7	1,440		
230,5	2,262				
400,4	2,990	— 402,4	— 3,009		-
574,2	3,720				
— 788,7	4,673	— 789,9	4,673	— 773,4	4,673

Fig. 18.

Tabelle 13. $H_{max} = 112{,}2$.

24 Stufen		12 Stufen		6 Stufen		3 Stufen		1 Stufe	
B	H	B	H	B	H	B	H	B	H
— 7571	— 112,2	— 8019	— 112,2	— 7998	— 112,2	— 7992	— 112,2	— 7971	— 112,2
		— 7805	102,7						
		— 7394	93,48	— 7504	92,15				
		— 7286	83,92						
		— 6984	74,78	6915	73,65	— 6920	74,78		
		— 6661	65,43						
	—	— 6258	— 55,90	6204	— 55,71				
		— 5843	46,73						
		— 5327	37,39	5250	37,01	— 5216	36,45		
		— 4829	28,97						
		4109	19,25	4071	18,69				
		3161	9,35						
1866	0,00	— 1897	0,00	— 1721	0,00	— 1776	0,00	— 1821	0,00
Kommutation der Stromrichtung.									
		+ 1335	9,35						
		+ 3132	18,88	+ 3279	18,69				
		+ 4086	28,04						
		+ 4818	37,58	+ 4957	37,01	+ 4865	36,45		
		+ 5391	46,73						
		+ 5873	+ 56,08	+ 6071	+ 56,08				
	+	+ 6314	65,43						
		+ 6672	74,78	+ 6853	74,40	+ 6819	75,15		
		+ 7017	84,12						
		+ 7326	93,48	+ 7476	92,53				
		+ 7612	102,8						
+ 7406	112,2	+ 7864	112,2	+ 8057	112,2	+ 7971	112,2	+ 7974	112,2

		+ 7658	102,8						
		+ 7437	93,48	+ 7567	92,72				
		+ 7158	83,92						
		+ 6845	74,40	+ 8988	74,03	+ 6982	74,78		
		+ 6521	65,24						
	+	+ 6144	55,90	+ 6265	+ 55,71		+		+
		+ 5748	+ 46,73						
		+ 5211	37,01	+ 5315	36,45	+ 5265	36,08		
		+ 4677	28,04						
		+ 3963	18,69	+ 4083	18,69				
		+ 3069	9,35						
+ 1256	0,00	+ 1801	0,00	+ 1896	0,00	+ 1892	0,00	+ 1801	0,00
Kommutation der Stromrichtung.									
		— 1424	9,35						
		— 3171	18,88	— 3116	18,69				
		— 4163	28,04						
		— 4878	37,39	— 4789	37,20	— 4760	36,08		
		— 5463	46,73						
	—	— 5937	— 56,08	— 5758	— 55,71		—		
		— 6372	65,43						
		— 6753	74,78	— 6699	74,03	— 6736	74,78		
		— 7089	84,12						
		— 7391	93,48	— 7357	91,98				
		— 7674	102,8						
— 8065	112,2	— 7938	112,2	— 7943	112,2	— 7978	112,2	— 8015	112,2

Fig. 23.

Die jetzt folgenden Tabellen (14–19) enthalten die durch die verschiedenen Stufen hervorgebrachten Unterschiede der B_{max} und der B_r vom $B_{max\ einjt.}$ und $B_{r\ einjt.}$*) in Prozent. Sie sind genau so angelegt, wie die Tabellen 4—11.

Tabelle 14.

$H_{max} = 4{,}673$; $\mu_{max} = 165{,}84$.

Stufen	B_{max}	% Diff.	Remanenz	% Diff.
1	775,0		235,4	
3	770,8	— 0,54	235,0	— 0,15
6	766,6	— 1,08	226,7	— 3,70

Tabelle 15.

$H_{max} = 9{,}347$; $\mu_{max} = 200{,}3$.

1	1872		745,3	
3	1819	— 2,83	717,1	— 3,53
6	1822	— 2,67	718,8	— 3,56
12	1805	— 3,58	725,7	— 2,62

Tabelle 16.

$H_{max} = 18{,}69$; $\mu_{max} = 174{,}6$.

1	3264		1279	
3	3234	— 0,92	1272	— 0,55
6	3216	— 1,47	1252	— 2,08
12	3211	— 1,62	1257	— 1,67
24	3189	— 2,29	1248	— 2,39

Tabelle 17.

$H_{max} = 37{,}39$; $\mu_{max} = 131{,}9$.

1	4932		1620	
3	4894	— 0,77	1604	— 1,03
6	4884	— 0,97	1611	— 0,57
12	4875	— 1,16	1600	— 1,26
24	4750	— 3,69	1584	— 2,24

*) „einstufig".

Tabelle 18.

$H_{max} = 74{,}77$; $\mu_{max} = 90{,}58$.

Stufen	B_{max}	% Diff.	Remanenz	% Diff.
1	6773		1803	
3	6767	— 0,09	1784	— 1,06
6	6763	— 0,15	1770	— 1,84
12	6746	— 0,40	1770	— 1,84
24	6700	— 1,08	1773	— 1,66

Tabelle 19.

$H_{max} = 112{,}2$; $\mu_{max} = 71{,}18$.

1	7983		1811	
3	7971	— 0,15	1834	— 1,28
6	8014	+ 0,39	1808	— 0,12
12	7921	— 0,77	1849	+ 2,11
24	7612	— 2,14	1561	— 13,79

Zur Veranschaulichung dieser Resultate habe ich die Kurven in Fig. 26 gezeichnet. Sie haben die Feldstärken H als Abszissen, die prozentualen Unterschiede in den B_{max} als Ordinaten.

Bei der sechsstufigen Kurve habe ich den Wert für $H = 297{,}7$ weggelassen, da er, wie man aus Tabelle 19 sieht, positiv ist. Bei der vierundzwanzigstufigen fällt der Punkt für $H = 37{,}39$ (Tabelle 17) ebenfalls aus der Reihe. Ich habe daher den wahrscheinlichen Verlauf der Kurve an dieser Stelle gestrichelt.

Zum Vergleich ist auf demselben Blatt rechts unten eine Kurve aus der Permeabilität und den Feldstärken gezeichnet. Es ergibt sich:

Der Einfluß der Stufenzahl auf die Größe von B_{max} ist in schwachen Feldern klein, im Maximum der Permeabilität am größten; er nimmt in stärkeren Feldern zu einem Minimum ab, um in noch stärkeren wieder anzusteigen.

Es ist also auch hier keine einfache Beziehung zur Permeabilität vorhanden. — Ein ähnliches Resultat erhielt Reinicke beim

Nickel.*) Auf die Koërzitivkraft hat die Anzahl der Stufen keinen Einfluß, soweit ich das bei der verhältnismäßig großen Entfernung der maßgebenden Punkte von einander behaupten darf.

Die Remanenz jedoch verhält sich ganz ähnlich wie die maximale Induktion.

Nachwirkung.

In der Hoffnung, evtl. den beobachteten Einfluß der Stufenzahl auf den magnetischen Endzustand auf Viskosität des Materials zurückführen zu können, stellte ich zum Schlusse noch eine Reihe von Versuchen nach dieser Richtung hin an.

Die Versuchsanordnung dazu war folgendermaßen getroffen: In den Primärkreis wurde eine Wippe gelegt, die dazu diente, den Strom zu schließen und zu öffnen. Mit dieser war durch einen Gummifaden die Wippe im Sekundärkreis (Fig. 6, d) verbunden. Legte ich die primäre um, so folgte nach längerer oder kürzerer Zeit**) die sekundäre, jenachdem der Faden loser oder straffer gespannt war. — Die beiden Wippen waren auf dem Tische befestigt. — Wollte ich längere Zeitunterschiede haben, so lockerte ich den Faden.

Die Beobachtungen machte ich in sämtlichen vorher untersuchten Feldern. Das Resultat ist folgendes:

Öffnete ich den Primärstrom und schloß darauf den Sekundärkreis, so erhielt ich nur ganz kleine Ausschläge, wie die von den Thermoströmen herrührenden. Es war ganz gleich, ob ich das Zeitintervall groß oder klein nahm.

Schloß ich jedoch den primären und darauf den sekundären Kreis, so erhielt ich Ausschläge bis zu einigen Centimetern, bei kleinem Sekundärwiderstand. Dieselben waren um so größer, je früher ich das Galvanometer einschaltete, zeigten sich beim Ring und der großen Primärspule des Stabes besonders stark und

*) Vergl. Fig. 26 mit Reinicke, Inaug.-Diss. Halle 1908 Fig. 3.

**) Von einer genauen Zeitbestimmung habe ich abgesehen, da diese Versuche nichts Merkliches ergaben. Die kleinsten angewendeten Zeitunterschiede betrugen etwa einige Hundertstel der Sekunde.

rührten demnach von der Selbstinduktion des Primärkreises her. Man konnte auch an dem aperiodischen Ampèremeter sehen, daß der Strom seine volle Stärke erst nach gewisser Zeit erlangte. Wartete ich mit dem Schließen des Sekundärkreises solange, bis der Primärstrom seine maximale Stärke erreicht hatte, was nach wenigen Sekunden der Fall war, so erhielt ich wieder nur ganz kleine Ausschläge von der Größenordnung der durch die Thermoströme verursachten. Es ist mir also nicht gelungen, Viskosität beim Kobalt in einwandfreier Weise festzustellen, geschweige denn zu messen. Jedenfalls kann dieselbe nur äußerst gering sein und zur Erklärung des Einflusses der Stufen nicht ausreichen.

Ergebnis.

Das durch die vorliegenden Untersuchungen erhaltene Ergebnis fasse ich in folgende Sätze zusammen:

Wie beim Eisen und Nickel zeigt sich auch beim Kobalt bei sämtlichen von mir untersuchten Feldstärken ein Einfluß der Stufenzahl auf den magnetischen Endzustand: Maximale Induktion und Remanenz nehmen mit der Größe der Stufen zu, während die Koërzitivkraft anscheinend unverändert bleibt.

Bei dem harten Kobaltstab ist der Einfluß der Stufen in schwachen Feldern am größten, im Maximum der Permeabilität ziemlich groß, in stärkeren Feldern kleiner und in den stärksten wieder größer.

Der weiche Kobaltring dagegen zeigt ein etwas anderes Verhalten: In den schwächsten Feldern ist der Einfluß der Stufenzahl klein, im Maximum der Permeabilität*) am größten, in stärkeren nimmt er bis zu einem Minimum ab, um in den stärksten wieder anzusteigen.

Bei beiden, dem Ring und in noch höherem Maße bei dem Stab, ist der Einfluß der Stufen auf die Remanenz größer als auf die maximale Induktion. Eine einfache Beziehung zur Permeabilität besteht nicht.

*) vergl. Rücker. Inaug.-Diss. Halle 1905 Seite 67.

Zum Schlusse möchte ich nicht versäumen, meinem Freunde, Herrn cand. ing. P. Rumpel, meinen besten Dank auszusprechen für die vielen Stunden, die er geopfert hat, um mir durch Notieren der abgelesenen Zahlen meine Beobachtungen wesentlich zu erleichtern.

Fig.1

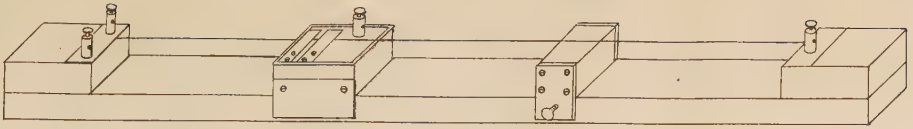


Fig. 2

Fig.3

Fig.7

Fig.8

Fig.4

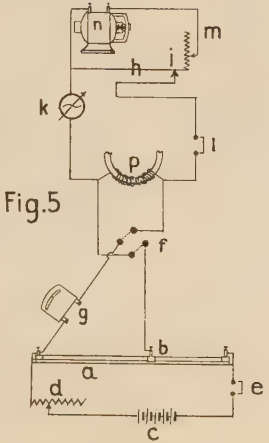


Fig.5

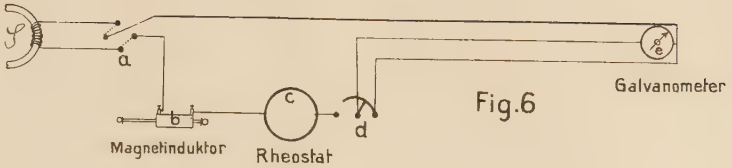
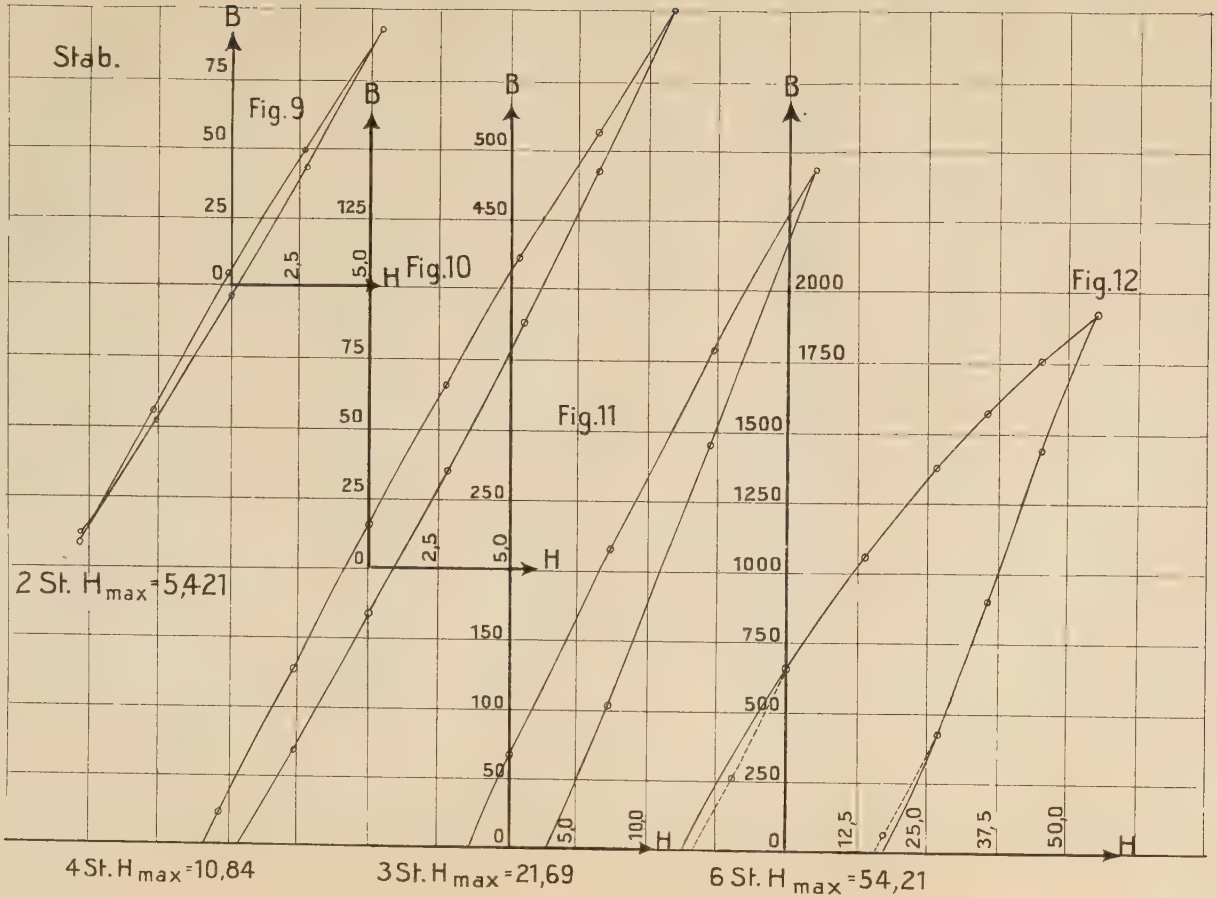
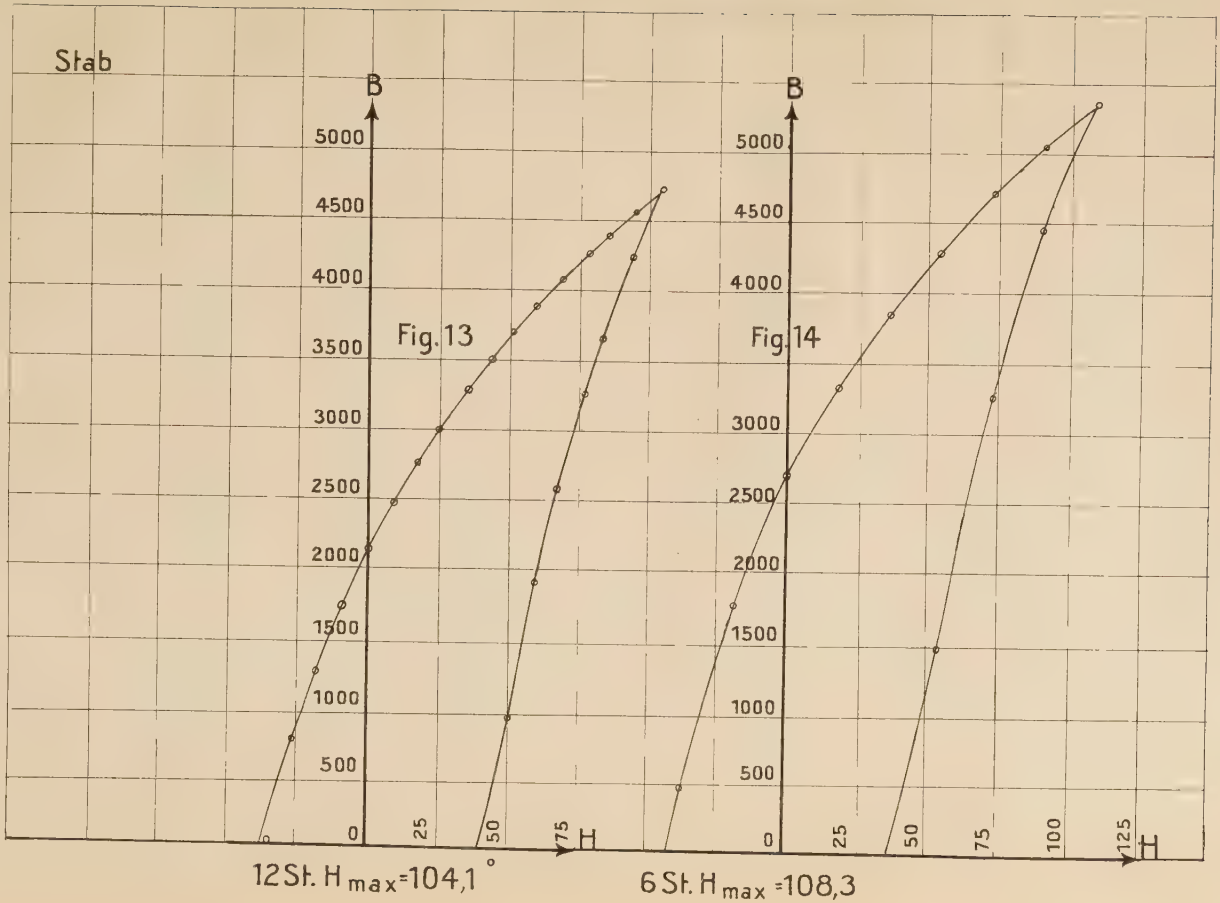
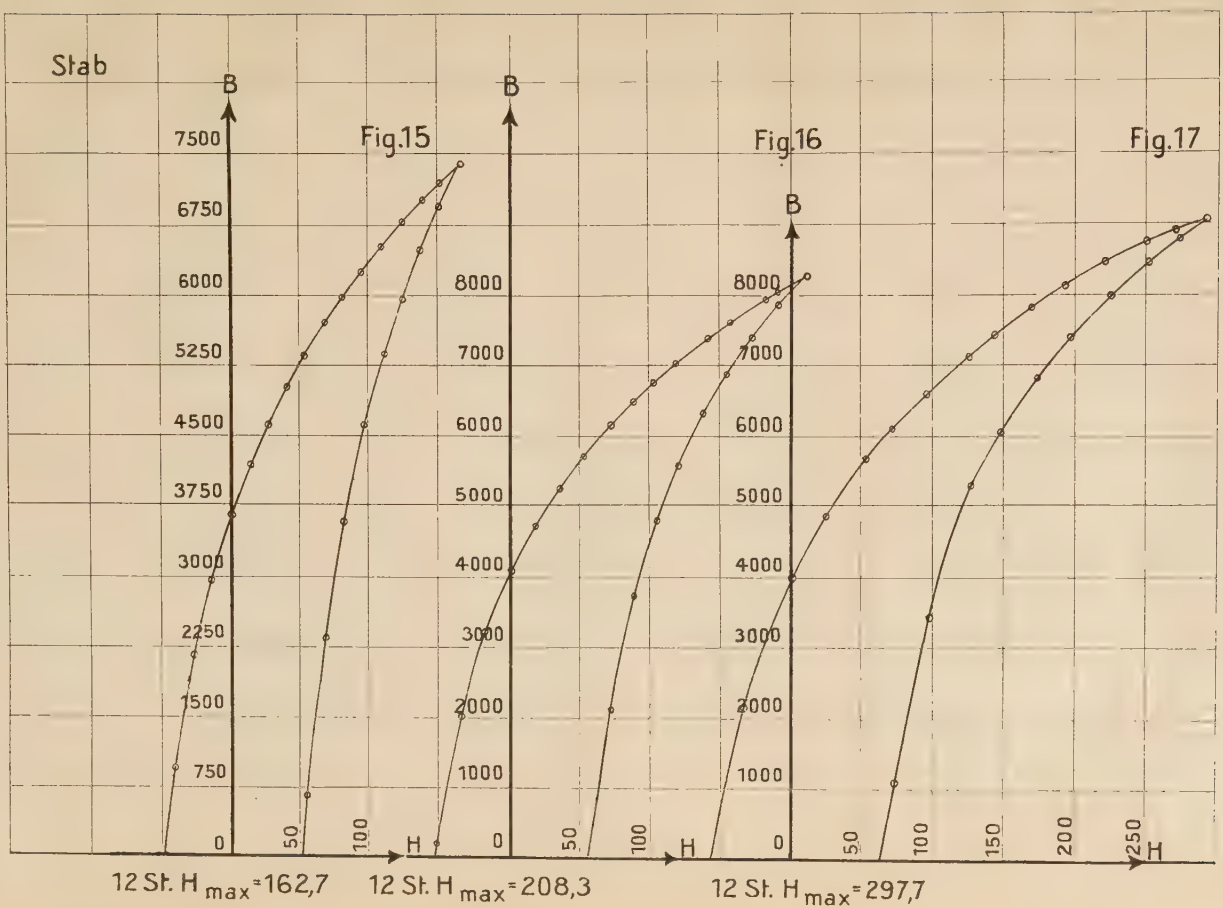


Fig.6


Stab.
B
H
Fig. 9
Fig. 10
Fig. 11
Fig. 12
2 St. H_{max} = 5,421
4 St. H_{max} = 10,84
3 St. H_{max} = 21,69
6 St. H_{max} = 54,21


Stab
B
5000
4500
4000
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
25
50
75
H
Fig. 13
12 St. H max = 104,1 °
B
5000
4500
4000
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
25
50
75
100
125
H
Fig. 14
6 St. H max = 108,3


Stab
B
7500
6750
6000
5250
4500
3750
3000
2250
1500
750
0
50
100
H
12 St. H max = 162,7
Fig.15
B
8000
7000
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
50
100
H
12 St. H max = 208,3
Fig.16
B
8000
7000
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
50
100
150
200
250
H
12 St. H max = 297,7
Fig.17

Ring

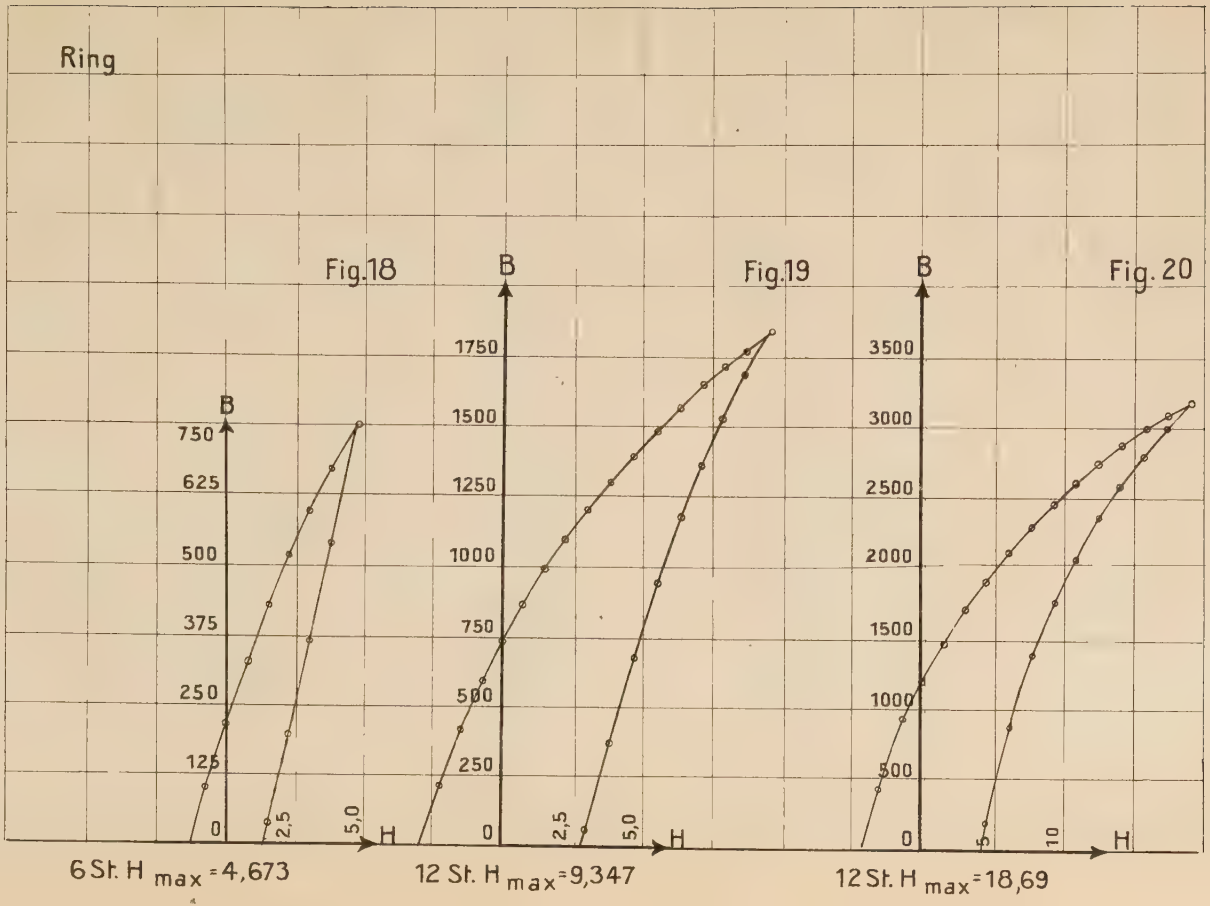
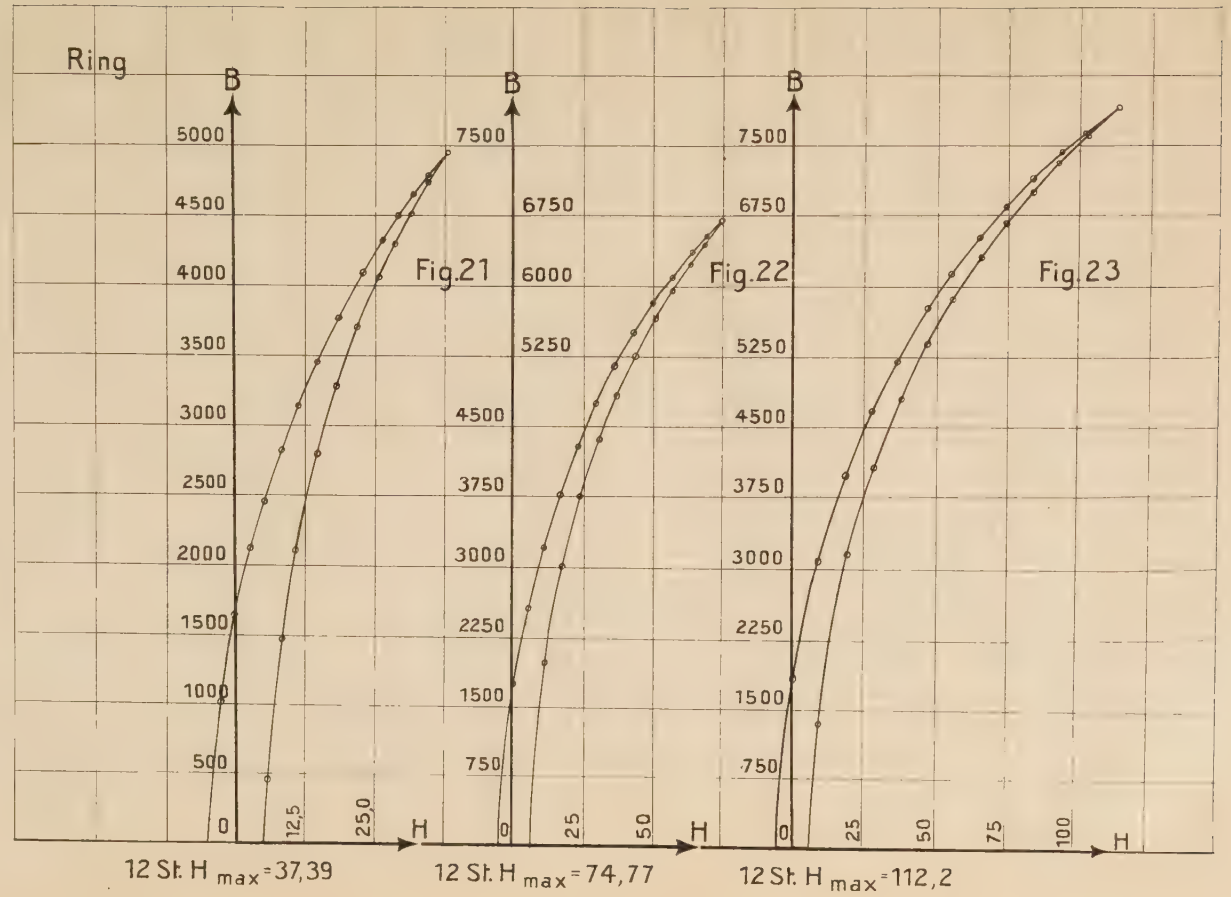


Fig.18
B
750
625
500
375
250
125
0
2,5
5,0
H
6 St. H max = 4,673
Fig.19
B
1750
1500
1250
1000
750
500
250
0
2,5
5,0
H
12 St. H max = 9,347
Fig. 20
B
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
5
10
H
12 St. H max = 18,69


Ring
B
5000
4500
4000
3500
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
12,5
25,0
H
12 St. H max = 37,39
Fig.21
B
7500
6750
6000
5250
4500
3750
3000
2250
1500
750
0
25
50
H
12 St. H max = 74,77
Fig.22
B
7500
6750
5250
4500
3750
3000
2250
1500
750
0
25
50
75
100
H
12 St. H max = 112,2
Fig.23

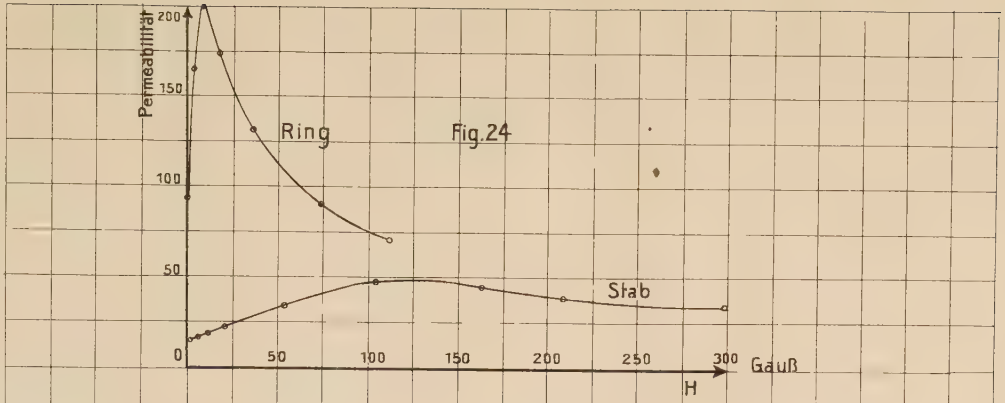

Permeabilität
200
150
100
50
0
Ring
Stab
50
100
150
200
250
300
Gauß
H

Fig.24

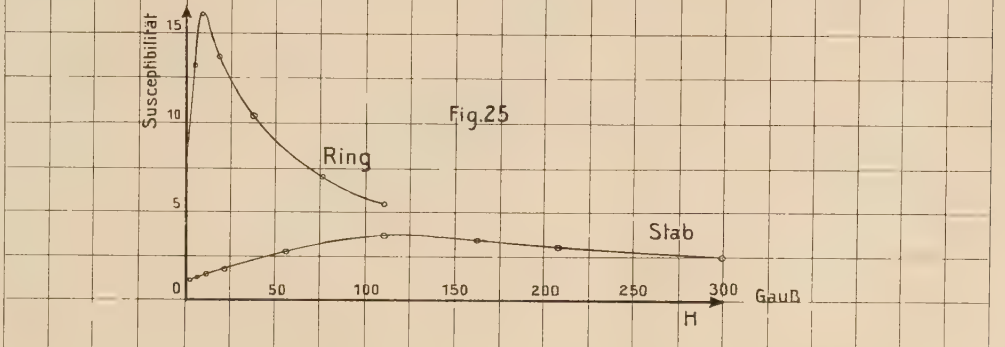
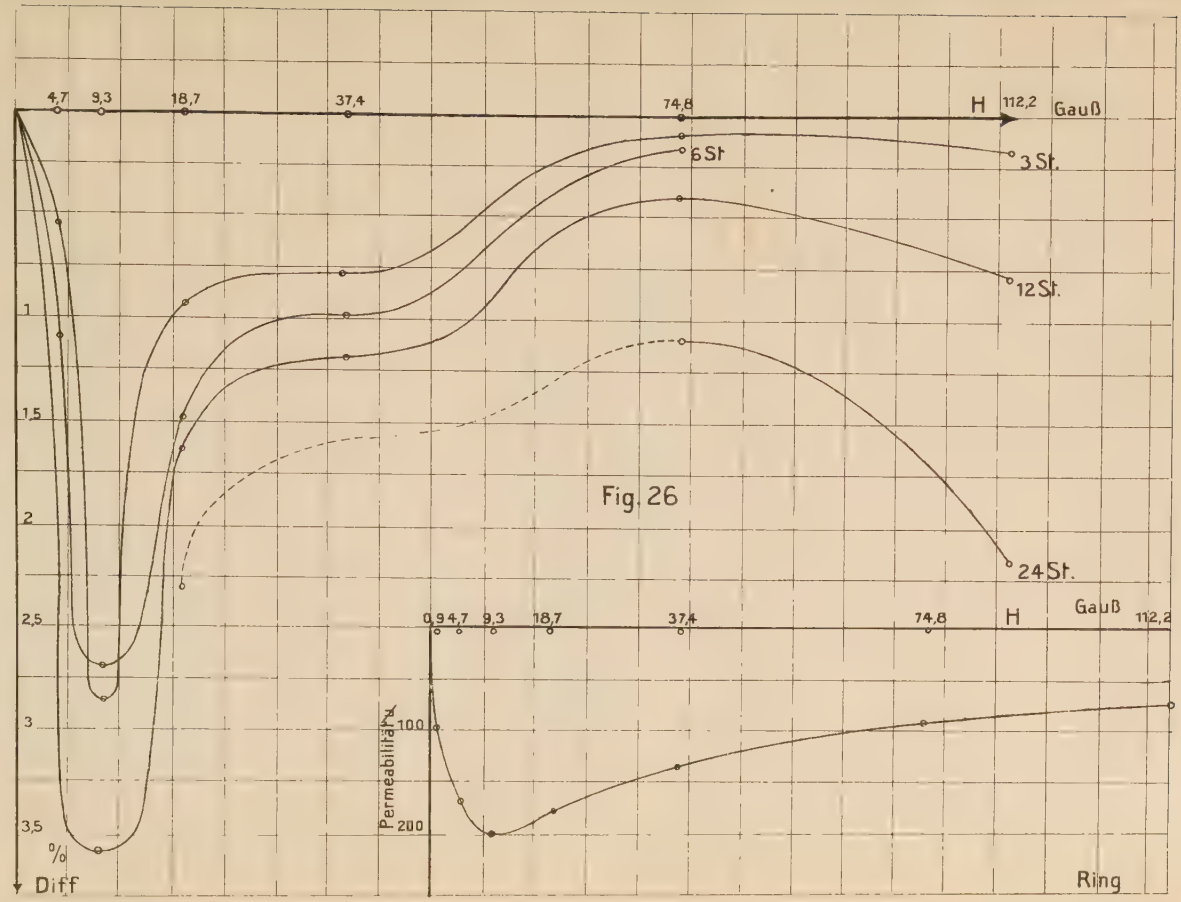

Susceptibilität
15
10
5
0
Ring
Stab
50
100
150
200
250
300
Gauß
H

Fig.25


4,7
9,3
18,7
37,4
74,8
H
112,2
Gauß
3 St.
6 St.
12 St.
24 St.
1
1,5
2
2,5
3
3,5
%
Diff
Fig. 26
0,9
4,7
9,3
18,7
37,4
74,8
H
Gauß
112,2
Permeabilität
100
200
Ring

Deformation infolge von Magnetisierung.

Inhaltsverzeichnis.

Seite

Einleitung 37
Apparate und Versuchsanordnung 38
Die Konstanten des Apparates 40
Versuche mit Kobalt 42
Versuche mit Nickel 43
Versuche mit Eisen:
Sprungfederdraht 43
Blumendraht 44
Weicher Eisendraht 45
Stahl 46
Ergebnis 46
Tabellen 48–49
Literaturangabe 50

Einleitung.

Da ich im ersten Teil meiner Arbeit für den sich in verschiedenen Feldern verschieden stark äußernden Einfluß der Stufenzahl auf den magnetischen Endzustand keine einfache Beziehung zur Feldstärke oder zur Permeabilität fand, kam ich auf den Gedanken, einmal zu untersuchen, wie sich das Kobalt in Bezug auf Deformierung durch magnetische Felder verhält.*) Es war ja nicht durchaus ausgeschlossen, daß man einige Vergleiche zwischen der Deformationskurve und den eigenartigen Kurven in Fig. 26 (1. Teil d. Arbeit) hätte ziehen können.

Eine zweckentsprechende Vorrichtung war bald konstruiert; ich konnte aber keine Abnahme der Zusammenziehung des Stabes bei etwa 150—200 Gauß, wie ich gehofft hatte, feststellen, sondern die Kurve verlief fast gerade. Da nun aber mein Interesse für die Längenänderungen der ferromagnetischen Metalle durch Magnetfelder wachgerufen war, machte ich noch einige Versuche mit Eisenstäben und stellte dabei bedeutende Unterschiede fest, die derselbe Stab in hartem und geglühtem Zustande zeigte.

Weil nun Untersuchungen nach dieser Richtung hin mir nicht bekannt sind, machte ich es mir zur Aufgabe, systematisch die drei Metalle Eisen, Kobalt und Nickel daraufhin zu untersuchen, welchen Einfluß das Ausglühen auf ihre Deformationsfähigkeit durch Magnetfelder ausübt.

Da die vorhandene Vorrichtung für genaue Messungen nicht recht geeignet war, konstruierte ich einen neuen Apparat, der allen Anforderungen genügte. An der Hand der Figuren werde ich ihn in folgendem beschreiben.

*) Literaturangabe auf Seite 50.

Apparate und Versuchsanordnung.

Das Gestell des Apparates besteht aus Holz, die Metallteile aus Messing oder Zink. In Fig. 1 bedeutet (a) einen zweiarmigen Hebel aus Messingrohr, dessen längerer Arm 32,5 cm, dessen kürzerer 1,1 cm lang ist. Derselbe liegt auf zwei Schneiden in den Lagern (b). An seinem Ende befindet sich eine schräg eingesetzte, ziemlich lange, vorn sauber gerundet und geglättete Schraube (c), welche die Bewegungen des Hebels auf den Spiegel (o) überträgt. Eine Feder (d), die regulierbar durch die Schraube (e) durch eine kleine Kette mit dem Hebel verbunden ist, drückt eine Schneide desselben gegen den zu untersuchenden Stab (x). Dieser stößt mit dem andern Ende gegen eine Mikrometerschraube (f), die sich durch den Arm (g), der mit ihr fest vereinigt ist, drehen läßt. Der gewöhnlich lose Zeiger (h) kann durch eine Mutter (i) ebenfalls fest mit der Schraube (f) verbunden werden. Der Zeiger bewegt sich vor einer Skale (k); er läßt sich mit Hülfe einer seitlich angebrachten, in der Figur nicht gezeichneten Schraube genau auf die einzelnen Skalenteile einstellen.

Der Hebel (a) stößt mit seiner Schraube (c) gegen die Glasplatte (Fig. 2, l) des Spiegelhalters, der auf den Spitzen (m) gelagert ist und durch ein kleines Gewicht (n) gegen die Schraube geneigt wird. (o) ist der Spiegel.

Der zu untersuchende Stab (x) befindet sich, durch zwei Lager (p) gehalten, im Innern der Magnetisierungsspule, die ihrerseits auf zwei geneigten Stützen ruht.

An den Apparat fest angeschraubt ist eine Stange, die eine 30 cm lange, senkrechte Skale trägt. Der Abstand der Skale vom Spiegel beträgt 1 m. Ebenfalls aus Bequemlichkeitsrücksichten ist ein Fernrohr mit neunmaliger Vergrößerung an dem Apparat fest angebracht.

Da ich von vornherein mit der durch die verschiedenen Temperaturen bedingten Längenausdehnung der Stäbe rechnete, ließ ich dieselben nicht gegen ein festes Auflager stoßen, sondern gegen eine bewegliche Schraube. Dadurch hatte ich den Vorteil, daß mir das Bild der Skale niemals aus dem Fernrohr gehen,

und daß ich immer dieselben Skalenteile verwenden konnte. Ich benutzte bei meinen Untersuchungen nur die Skalenteile von 10 bis 20, also nur 10 cm. Die Ausschläge in diesem Intervall waren hinreichend gleichmäßig.

Um bei der verhältnismäßig kleinen Hebelübersetzung doch große Ausschläge des Spiegels zu erhalten, ließ ich die Schraube (Fig. 1, c) möglichst nahe an der Drehachse des Spiegelhalters angreifen. Da die Schraube (c) schief in den Hebel eingesetzt ist, kann man durch Rechtsdrehen derselben die Empfindlichkeit verkleinern, durch Linksdrehen vergrößern, da dadurch die Entfernung der Schraubenspitze von der Drehachse des Spiegelhalters geändert wird.

Die Empfindlichkeit des Apparates berechnete ich nicht aus dem Übersetzungsverhältnis der Hebel, sondern mit Hülfe der Mikrometerschraube. Die einzelnen Hebellängen lassen sich nämlich erstens schwer genau feststellen, zweitens können erhebliche Fehler durch das Durchbiegen der Hebelarme und der Lager entstehen. Alle diese Fehler vermeide ich durch Anwendung der Mikrometerschraube.

Mit ihrer Hilfe kontrollierte ich vor und nach jedem Versuch die Empfindlichkeit, indem ich den Zeiger (h) zehnmal um je 10 Skalenteile drehte und die entsprechenden Ausschläge, die ich im Fernrohr erhielt, notierte. Das Mittel aus diesen Ausschlägen will ich der Einfachheit wegen von jetzt ab mit E (Empfindlichkeit) bezeichnen.

Den Zeiger (h) schraubte ich gewöhnlich während der Versuche los, da ich so bequemer den Wärmeausdehnungen der Stäbe folgen konnte. Die Empfindlichkeit des Apparates in dieser Beziehung war so groß, daß man einen Ausschlag von mehreren Centimetern erhielt, wenn man die Hand in die Nähe des zu untersuchenden Stabes (ohne Spule) brachte.

Den magnetisierenden Strom entnahm ich bei dreien meiner Versuche einer Akkumulatorenbatterie von 120 Volt, die mir in einem Nachbarstädtchen in einer Wollspinnerei zur Verfügung gestellt wurde. Da kein Zellenschalter vorhanden war, nahm ich den Strom direkt von den einzelnen Zellen ab. Bei den übrigen Versuchen benutzte ich eine kleine Akkumulatorenbatterie von 14 Volt.

Ein drehbarer Kommutator und ein geeigneter Rheostat dienten zum Entmagnetisieren der Stäbe vor dem Versuch. Als Ampèremeter benutzte ich ein Drehspulinstrument, das bei einem Widerstand von 5 Ohm 100 Milliampère maximal zu messen gestattete. Durch einen Stöpsel konnten zwei Nebenschlüsse eingeschaltet werden, von denen der eine den Meßbereich verzehnfachte, der andere verhundertfachte, sodaß ich also Ströme von 0,001 bis zu 10 Ampère messen konnte.

Die Konstanten des Apparates.

Der an der Mikrometerschraube angebrachte Zeiger bewegt sich vor einer Skale, deren Radius $r = 238{,}5$ mm lang ist. Ein Skalenteil dieser Skale ist gleich 1,51 mm. Also ist der

$$\frac{\text{Kreisumfang}}{1{,}51} = 992{,}4.$$

Nun gehen 20 Schraubengänge auf 10,10 mm. Ein Schraubengang hat also eine Höhe von 0,505 mm. Drehe ich den mit der Schraube fest verbundenen Zeiger um 1 Skalenteil, so bewirkt dies eine Verschiebung der Schraube um

$$\frac{0{,}505}{992{,}4} = 0{,}0005089 \text{ mm, d. h. um rund } \frac{1}{2000} \text{ mm.}$$

Da nun eine Drehung der Schraube um 1 Skalenteil ca. 6 mm Ausschlag (E) im Fernrohr gibt, entspricht also 1 mm Ausschlag im Fernrohr einer Verschiebung der Schraube um

$$\frac{0{,}0005089}{E} = \text{rund } \frac{1}{12000} \text{ mm.}$$

Die verwendeten Stäbe wurden möglichst genau 310,0 mm lang gemacht. Ein Längenunterschied von 0,1 mm bedeutet einen Fehler von ca. $\frac{1}{30}\,\%$. Man kann also mit hinreichender Genauigkeit bei der Berechnung die Zahl 310 für alle Stäbe einsetzen.

Um nun die Längenänderung der Stäbe als Teil ihrer eigenen Länge zu erhalten, müssen die im Fernrohr gemessenen Ausschläge multipliziert werden mit

$$\frac{0{,}0005089}{310{,}0 \cdot E}.$$

Es bedeutet also eine Ausdehnung der Stäbe, die im Fernrohr als 1 mm gemessen wurde, den 3720000ten Teil ihrer Länge bei einem Skalenabstand von 1 m.

Die Empfindlichkeit des Apparates läßt sich durch Verstellen der Schraube (c, Fig. 1) noch ungefähr um die Hälfte erhöhen.

Die Magnetisierungsspule bestand aus 8 Lagen von 0,9 mm und aus 7 Lagen von 0,8 mm starkem Kupferdraht, der zweimal umsponnen und gewachst war. Der Draht war auf ein Pappрohr von 0,7 cm Durchmesser gewickelt. Es gingen von dem 0,9 mm dicken Draht 6,41, von dem 0,8 mm dicken 6,46 Windungen auf 1 cm. Es kommen also bei den 15 Lagen $6{,}41 \cdot 8 + 6{,}46 \cdot 7 = 96{,}50$ Windungen auf 1 cm.

Länge der Spule = 30,6 cm.
Äußerer Radius = 2,3 cm.
Innerer Radius = 0,35 cm.
Widerstand = ca. 10 Ohm.

Die magnetisierenden Felder berechnete ich nach der Formel

$$H = \frac{4 \cdot \pi \cdot n \cdot i}{10} = 121{,}3 \cdot i$$

in unserm Falle. (n = Windungen auf 1 cm; i = Stromstärke in Ampère).

Wegen der Kürze der Spule und wegen der entmagnetisierenden Intensität der Stabenden waren die Felder natürlich kleiner und auch nicht ganz gleichmäßig, aber hiervon habe ich abgesehen, da es mir hauptsächlich auf vergleichende Messungen ankam, weniger auf die Absolutwerte.

Der Gang der Versuche gestaltete sich nun folgendermaßen: Nachdem der Stab durch Stromwechsel entmagnetisiert war, wurde die Empfindlichkeit festgestellt. Dann ließ ich den magnetisierenden Strom unter fortwährendem Kommutieren allmählich soweit anwachsen, bis ich merkliche Ausschläge des Spiegels erhielt. Die betreffende Stromstärke wurde notiert. Bei den darauf folgenden größeren Feldstärken machte ich gewöhnlich 5 oder 10 Ablesungen, indem ich nach jedem Stromschluß, der gewöhnlich nur einen Bruchteil der Sekunde dauerte, die Strom-

richtung kommutierte. Zum Schluß wurde wieder die Empfindlichkeit bestimmt.

Versuche mit Kobalt.

Der Kobaltstab ist der im ersten Teil meiner Arbeit untersuchte. Er war ungefähr 100 mal so lang als dick. Er wurde wie alle übrigen Stäbe fast über die ganze Länge mit einer Papierhülse umgeben, die gut mit Talkum eingerieben war, damit sie in der Magnetisierungsspule bequem gleiten konnte. Die Hülse hatte den Zweck, die Stäbe genau in die Mitte der Spule zu bringen, um eine ungleichmäßige Magnetisierung zu vermeiden.

In schwachen Feldern war keine Längenänderung wahrzunehmen. Erst bei etwa 60 Gauß konnte ich ein Einwirken des Feldes auf den Stab konstatieren. Bei 97 Gauß zog er sich schon um ca. 1,3 Zehnmilliontel seiner eigenen Länge zusammen. Das Resultat des Versuches ist in Tabelle 1 zusammengestellt. Die zugehörige Kurve ist in Fig. 3 ganz und in Fig. 4 zum Teil gezeichnet. Ein Maximum der Zusammenziehung, wie Bidwell (Ewing Seite 228—229) es schon bei 750 Gauß erreichte, konnte ich nicht feststellen, wie ich ja schon in der Einleitung bemerkt habe. Allerdings ist aus dem Verlauf der Kurve in Fig. 3 zu ersehen, daß sie wahrscheinlich bald ein Maximum erreichen wird.*)

Die Kurve in Fig. 4 zeigt das Ergebnis der Versuche mit dem ausgeglühten Kobalt.

Der über einem Bunsenbrenner mehrmals gut geglühte Stab reagierte viel früher auf das magnetische Feld. Schon bei 16 Gauß konnte ich merkliche Ausschläge im Fernrohr feststellen und bei 175 Gauß ist die Zusammenziehung ca. sechsmal so groß als die beim harten Kobalt. Der Verlauf der Kurve zeigt, daß das Maximum der Zusammenziehung bald erreicht ist.

*) Die Tabellen zu den folgenden Versuchen gebe ich nicht wieder, da man aus ihnen nichts besonderes ersehen kann und der Verlauf der Versuche aus den betreffenden Kurven hervorgeht. Nur beim Nickel (hart) lasse ich die zugehörige Tabelle folgen, da das Nickel ein eigentümliches Verhalten zeigt, das aus der Kurve allein nicht ersichtlich ist.

Versuche mit Nickel.

Den Nickelstab bezog ich von den „Westfälischen Nickelwerken" in Schwerte. Von der Firma war er als Reinnickel, $^1/_2$ hart bezeichnet. Er war wie der Kobaltstab 3 mm dick und daher etwa 100 mal so lang als dick. Der Stab war ziemlich hart, und es ist mir anscheinend nicht gelungen, ihn vollständig zu entmagnetisieren, wie ich aus dem Verlauf der Kurve in Fig. 4 und seinem sonstigen Verhalten annehmen muß. Bei etwa 6 Gauß konnte ich den Einfluß des Feldes auf den Stab feststellen. Bei 8,5 Gauß dehnte er sich um etwa $0{,}27 \cdot 10^{-7}$ seiner eigenen Länge aus, oder er zog sich um denselben Betrag zusammen, jenachdem ich den Strom in der einen oder der andern Richtung durch die Spule schickte. Dies an sich auffällige Verhalten habe ich durch verschiedene Versuche als sicher festgestellt, es dürfte von remanentem Magnetismus herrühren. Von etwa 12 Gauß an konnte ich nur noch Zusammenziehung konstatieren; jedoch waren die Ausschläge, die ich bei der einen Stromrichtung erhielt, kleiner als die bei der andern Stromrichtung. In Tabelle 2 ist dies aus den zwei in einer Rubrik nebeneinander geführten Zahlenreihen zu erkennen. Bei 49,72 Gauß waren die Unterschiede nicht mehr merklich und von da an zeigt die Kurve einen regelmäßigen Verlauf.

Nach diesem Versuch wurde der Stab gut ausgeglüht. Schon bei etwa 1,5 Gauß rührte sich der Spiegel. Ebenso wie beim vorigen Versuch erhielt ich anfangs, hier bei 1,8 Gauß, Ausdehnung und Zusammenziehung. Von 2 Gauß an zog sich der Stab nur noch zusammen. Die Kurve in Fig. 4 zeigt den weiteren Verlauf des Versuches, sie geht ähnlich wie die Kobaltkurve viel tiefer als die Kurve des harten Nickels. Zu Anfang ist sie sehr steil.

Versuche mit Eisen.

Sprungfederdraht.

Der zuerst untersuchte Stab bestand aus sogenanntem Sprungfederdraht, einer ziemlich hart gezogenen Eisensorte. Er

war wie die vorigen Stäbe etwa 100 mal so lang als dick, reagierte später als das Nickel, erst bei etwa 8 Gauß, auf das Magnetfeld und dehnte sich bis zu einem Maximum bei 70,33 Gauß aus. Die Ausdehnung nahm allmählich ab und war bei 285 Gauß gleich Null. (Vergl. die mit „Eisen" bezeichnete Kurve in Fig. 3.) An dieser Stelle zeigte sich ein merkwürdiges Zucken oder Stampfen des Hebels beim Ausschalten des Stromes. Bei den folgenden Feldstärken zog sich das Eisen zusammen.

Die größte Ausdehnung, die ich erhielt, betrug $28{,}75 \cdot 10^{-7}$ der Stablänge. Auch ein Maximum der Zusammenziehung habe ich beobachtet. Es lag zwischen 1200 und 1400 Gauß. Leider konnte ich mit dem mir zur Verfügung stehenden Ampèremeter nur Stromstärken bis zu 10 Ampère messen, sodaß ich stärkere nur aus dem Widerstande der Spule und der Höhe der angelegten Spannung schätzen konnte. Des Maximum der Zusammenziehung betrug etwa $40 \cdot 10^{-7}$ der Stablänge.

Die Kurve „Eisen geglüht" in Fig. 3 zeigt das Ergebnis des Versuches mit einem Stabe, der von demselben Draht abgeschnitten war wie der vorige und gut ausgeglüht wurde. — Nur in diesem einen Falle habe ich nicht denselben Stab geglüht. — Etwas früher als beim nicht geglühten Stabe erhielt ich merkliche Ausschläge im Spiegel und zwar bei etwa 6 Gauß. In den in Fig. 3 gezeichneten Kurven kommt dies nicht zum Ausdruck. Das Maximum der Ausdehnung war schon bei 45,71 Gauß erreicht; es betrug aber nur 11,65 gegen 28,75 Zehnmilliontel der Stablänge beim harten Eisen. Die Ausdehnung war Null schon bei etwa 120 Gauß. Auch bei dem ausgeglühten Stabe erhielt ich das eigenartige Zucken des Hebels an dieser Stelle.

War das Maximum der Ausdehnung kleiner als beim harten Eisen, so war dafür das Maximum der Zusammenziehung größer und zeigte sich schon bei 836 Gauß ($64{,}80 \cdot 10^{-7}$).

Blumendraht.

Die beiden Kurven in Fig. 4 zeigen den Verlauf eines Versuches mit Blumendraht. Da der Blumendraht einzeln zu

dünn war, untersuchte ich ein Bündel von Drähten. Zu diesem Zwecke steckte ich ihre Enden in kleine, 0,5 cm lange Messingröhren und lötete sie darin fest.

Die beiden Kurven zeigen, daß auch hier wie bei den vorher untersuchten Eisenstäben das Maximum der Ausdehnung nach dem Ausglühen kleiner ist und früher erreicht wird. Der Blumendraht zeigte bedeutend größere Ausdehnung als das Sprungfedereisen. Der ausgeglühte Draht reagierte auch hier ein wenig früher auf das magnetische Feld, doch war der Unterschied nur gering. (Anfang der Einwirkung des Feldes auf den ungeglühten Draht bei 8,48, auf den geglühten bei 7,58 Gauß. Das Maximum der Ausdehnung betrug beim ungeglühten Drahte $42{,}12 \cdot 10^{-7}$ und trat ein bei 72,76 Gauß. Das Maximum der Ausdehnung betrug beim geglühten Drahte $19{,}08 \cdot 10^{-7}$ und trat ein bei 66,70 Gauß.)

Weicher Eisendraht.

Bei den jetzt folgenden Versuchen gebe ich nur die Hauptergebnisse (ohne Kurven) an.

Andere Eisensorten, die ich untersuchte, zeigen ein ähnliches Verhalten wie die vorigen. So habe ich z. B. weichen verzinnten Eisendraht von 1,5 mm Stärke der Einwirkung der Magnetfelder ausgesetzt. Bei dem ungeglühten Draht brachte ein Feld von etwa 3,5 Gauß merkliche Längenänderungen hervor; bei dem geglühten trat die Wirkung schon bei etwa 2,8 Gauß ein. Beim ungeglühten Draht erhielt ich als Maximum der Ausdehnung $51{,}70 \cdot 10^{-7}$ bei 60,6 Gauß, beim weichen Draht $42{,}17 \cdot 10^{-7}$ bei 36,4 Gauß.

Von demselben Draht wurde ein Stück 75 mal um seine Längsachse tordiert. Dies so deformierte Eisen zeigte ein etwas anderes Verhalten: Nachdem der Stab ausgeglüht war, fing er wie die andern früher an sich auszudehnen; auch trat das Maximum der Ausdehnung früher auf. Doch im Gegensatz zu dem nicht deformierten Eisen war das Maximum beim geglühten Stabe größer als beim ungeglühten. (Anfang der Einwirkung des Feldes auf den ungeglühten Draht bei 4,4, auf den geglühten

bei 2,9 Gauß. Das Maximum der Ausdehnung betrug beim ungeglühten Draht $18{,}77 \cdot 10^{-7}$ und trat ein bei 75,2 Gauß; das Maximum der Ausdehnung betrug beim geglühten Draht $27{,}75 \cdot 10^{-7}$ und trat ein bei 24,3 Gauß.)

Versuche, die ich an andern tordierten Stäben zur Kontrolle machte, bestätigten dies Resultat. Die Werte sind kleiner als die bei dem nicht deformierten Draht.

Stahl.

Zur Vervollständigung meiner Untersuchungen habe ich noch einige Stahlsorten herangezogen. Der Beginn der Längenänderung tritt beim Stahl viel später auf als beim Eisen.

Ich untersuchte z. B. einen Federstahl. Derselbe war achtkantig und etwa 70 mal so lang als dick. Erst bei 84 Gauß reagierte er auf das magnetisierende Feld. Die Ausdehnung war etwa $3{,}0 \cdot 10^{-7}$ bei 145 Gauß, also sehr gering.

Nachdem ich den Stahl gut geglüht hatte, dehnte er sich nicht mehr aus, sondern zog sich von Anfang (48,5 Gauß) an zusammen. Bei 145 Gauß betrug die Zusammenziehung $13{,}45 \cdot 10^{-7}$ der eigenen Länge.

Weiter untersuchte ich einige Stäbe aus Stahl, wie er zur Herstellung von Schirmen benutzt wird. Dieselben waren so hart, daß sie von einer guten Feile kaum angegriffen wurden. Dieser Stahl zeigte ein anderes Verhalten: er dehnte sich nicht mehr aus, sondern zog sich nur noch zusammen, und im Gegensatz zu den andern Stäben verkürzte er sich nach dem Ausglühen weniger und reagierte später auf das Magnetfeld.

Ich untersuchte mehrere Stäbe von derselben Stahlsorte: alle zeigten das gleiche Verhalten.

Das Ergebnis

meiner Untersuchungen in Bezug auf die Deformation infolge von Magnetisierung ist also folgendes:

1) Durch das Ausglühen werden die ferromagnetischen Metalle für die Einwirkung von Magnetfeldern empfänglicher gemacht.

2) Ausgeglüht ziehen sie sich bedeutend mehr zusammen als ungeglüht.
3) Beim Eisen nimmt das Maximum der Ausdehnung durch Ausglühen ab. Bei Stahl kann es vorkommen, daß die Ausdehnung gleich Null wird.
4) Bei den untersuchten Eisensorten tritt das Maximum der Ausdehnung nach dem Ausglühen stets bei kleineren Feldstärken auf als vor dem Ausglühen. Dasselbe Verhalten zeigt das Maximum der Zusammenziehung, wie aus dem Versuch mit dem Sprungfederdraht zu ersehen ist. (Vergl. auch Kobalt und Nickel.)

Eine Ausnahme von diesem Verhalten zeigen der tordierte Draht und der zum Schluß untersuchte Stahl.

Bemerken möchte ich noch, daß man nach Bidwell und Honda u. Shimizu Verringerung der Längenausdehnung und Vergrößerung der Kontraktion dadurch erreichen kann, daß man die Stäbe einem longitudinalen Zug unterwirft. Kobalt macht hierin allerdings eine Ausnahme.

Tabelle 1.

Kobalt.

ca. 60	97,01	130,9	284,9	406,1	527,4	639,0	763,8	1170	Gauß.
		1,9	9,8	16,8	23,6	28,5	36,0	43,0	
		2,3	10,0	17,1	23,8	28,8	36,2	45,0	
		1,8	9,6	16,4	23,1	28,5	34,0	43,4	Im
		2,0	10,0	16,6	23,9	29,2	36,3	46,0	Fernrohr
		1,8	9,9	15,6	22,9	28,7	35,8	46,0	gemessene
		2,0	10,2	16,3	23,4	29,6	36,2	46,8	Ausschläge
		2,0	10,0	16,1	23,8	28,6	33,9	44,2	in
		2,3	10,0	16,5	23,9	29,5	34,1	45,0	mm.
		2,0	9,6	16,5	23,2	28,7	31,3	44,1	
		2,2	10,0	16,9	23,5	29,7	32,4	44,3	
Anfang	ca. 0,75	2,03	9,91	16,48	23,61	28,98	34,62	44,78	Mittel
	1,98	5,364	26,19	43,54	62,38	76,58	91,49	118,3	Zehnmillionstel der Stablänge.

\+ = Ausdehnung.
− = Zusammenziehung.

Empf.		
6,23	6,25	
21	23	
21	18	
20	24	
19	24	
25	24	
18	21	
19	21	
20	23	
20	23	
6,206	6,216	
6,211		

Tabelle 2. **Nickel.**

ca. 6,0	8,5	12,0	24,25	36,38	49,72	Gauß.
			3,2 4,9	6,6 7,8	27,4	
			3,0 5,0	6,5 7,9	27,0	
			3,2 5,0	6,7 8,0	26,7	Im
			3,2 5,0	6,5 7,9	27,3	Fernrohr
			3,1 5,0	6,7 8,1	27,4	gemessene
			3,0 5,1	6,2 8,1	27,3	Ausschläge
			3,0 5,0	6,3 7,7	27,0	in
			3,0 5,0	6,4 8,0	26,8	mm.
			3,0 5,0	6,4 7,7	26,5	
			3,3 5,0	6,2 7,6	26,7	
Anfang	ca. ± 0,1	ca. — 0,5	4,05	7,17	27,01	Mittel.
	ca. ± 0,27	— ca. 1,34	— 10,87	— 19,24	— 72,51	Zehnmilliontel der Stablänge.

Empf.

6,18 11 03 14 21 08 16 25 14 08 6,138

6,16 01 10 00 14 03 15 10 12 10 6,091

6,115

61,84	72,76	84,87	97,01	107,9	169,7	Gauß.
33,8	39,0	42,7	45,9	49,6	59,4	
33,7	38,7	42,3	45,7	49,7	59,2	
33,8	38,8	42,3	46,1	49,5	58,7	Im
34,0	38,8	42,7	45,8	49,3	58,5	Fernrohr
33,8	39,0	42,1	45,7	49,3	58,7	gemessene
33,7	39,2	42,8	46,1	49,8	59,4	Ausschläge
33,7	39,0	42,5	46,0	49,7	59,2	in
33,5	39,1	42,6	46,2	49,2	58,8	mm.
33,5	39,0	42,7	46,2	49,3	58,7	
33,1	38,7	42,2	46,0	49,2	59,0	
33,66	38,93	42,49	45,97	49,46	58,96	Mittel.
— 90,35	— 104,5	— 114,0	— 123,4	— 132,7	158,2	Zehnmilliontel der Stablänge.

Literaturangabe.

Über Deformation infolge von Magnetisierung haben unter andern gearbeitet:

Austin, L. Beobachtungen über die magnetischen Längenänderungen der Heusler'schen Mangan-Aluminium-Kupfer-Legierungen. Berlin Verh. D. phhsik. Ges. 6. 1904 (211—218).

Bidwell. Seine Hauptergebnisse sind von J. A. Ewing in seinem Buche, Magnetische Induktion in Eisen und verwandten Metallen, auf Seite 227—231 zusammengestellt worden.

K. Honda u. Shimizu. Längenänderung infolge von Magnetisierung bei konstanter Spannung. Physik. Zs. Leipzig 3. 1902 (378—381). Die Längenänderungen ferromagnetischer Substanzen unter dem Einfluß von Magnetisierung bei hohen und niederen Temperaturen. Physik. Zs. Leipzig 4. 1903 (499—503).

Tangl, K. Untersuchungen über die mechanischen Wirkungen der Magnetisierung. Math. natw. Ber. Ungarn Leipzig 18 (1900, 1903).

Ältere Literatur: Siehe Literaturangaben von Ewing, Magnetische Induktion in Eisen und verwandten Metallen, deutsche Ausgabe von Holborn u. Lindeck 1892, Seite 226.

Lebenslauf.

Geboren bin ich, Carl Asmus, evangelischer Konfession, preußischer Staatsangehörigkeit, am 1. September 1885 zu Dramburg in Pommern. Von Ostern 1892 bis Ostern 1895 besuchte ich die Dramburger Volksschule, darauf neun Jahre das Dramburger Gymnasium, welches ich Ostern 1904 mit dem Zeugnis der Reife verließ. Ich studierte sodann 5 Semester in Berlin und 3 Semester in Halle Physik, Mathematik und Chemie. Darauf war ich ein Jahr im physikalischen Laboratorium des Polytechnikums zu Cöthen (Anhalt) als Assistent tätig. Am 9. Dezember 1909 bestand ich die mündliche Doktorprüfung.

Während meines Studiums waren meine Lehrer die Herren Professoren und Dozenten:

Aschkinas, v. Bezold, Blasius, Börnstein, Claisen, Döring, Drude, Frobenius, Hettner, Knoblauch, Krigar-Menzel, Landau, Landolt, Lasson, Schottky, Slaby, Starke, Warburg;

Dorn, Fries, Gutzmer, Luedecke, Volhard, Vorländer.

Ich versichere dieselben, besonders aber Herrn Geh. Reg.-Rat Prof. Dr. Dorn, meines dauernden Dankes.

Zum Schlusse sei es mir noch gestattet, Herrn Fabrikbesitzer Graffunder meinen Dank dafür auszusprechen, daß er mir in so liebenswürdiger Weise seine Akkumulatorenbatterie zur Verfügung gestellt hat.

Längenänderung infolge von Magnetisierung

Fig.2

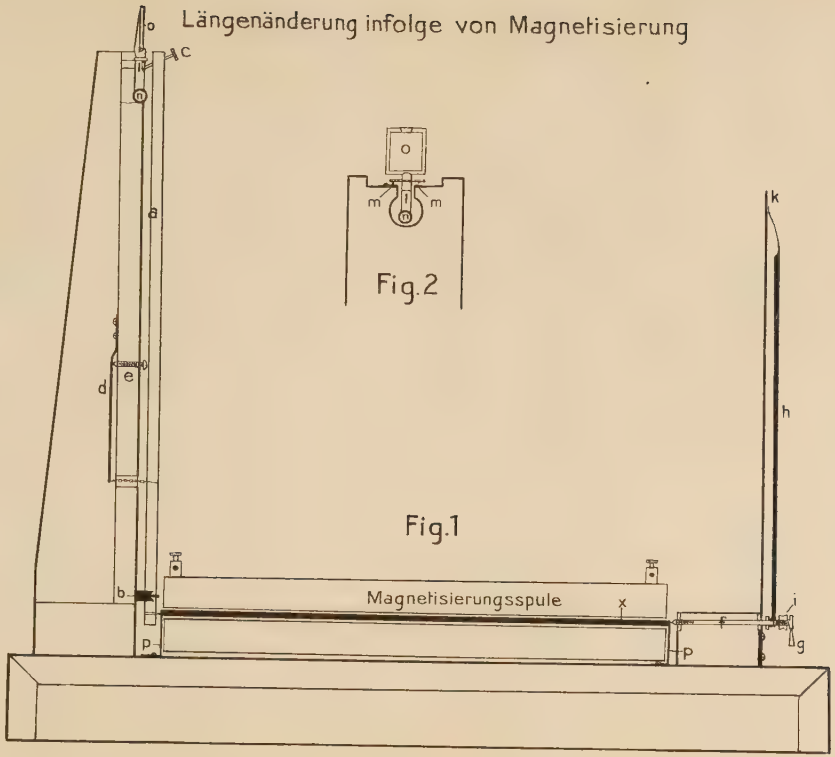
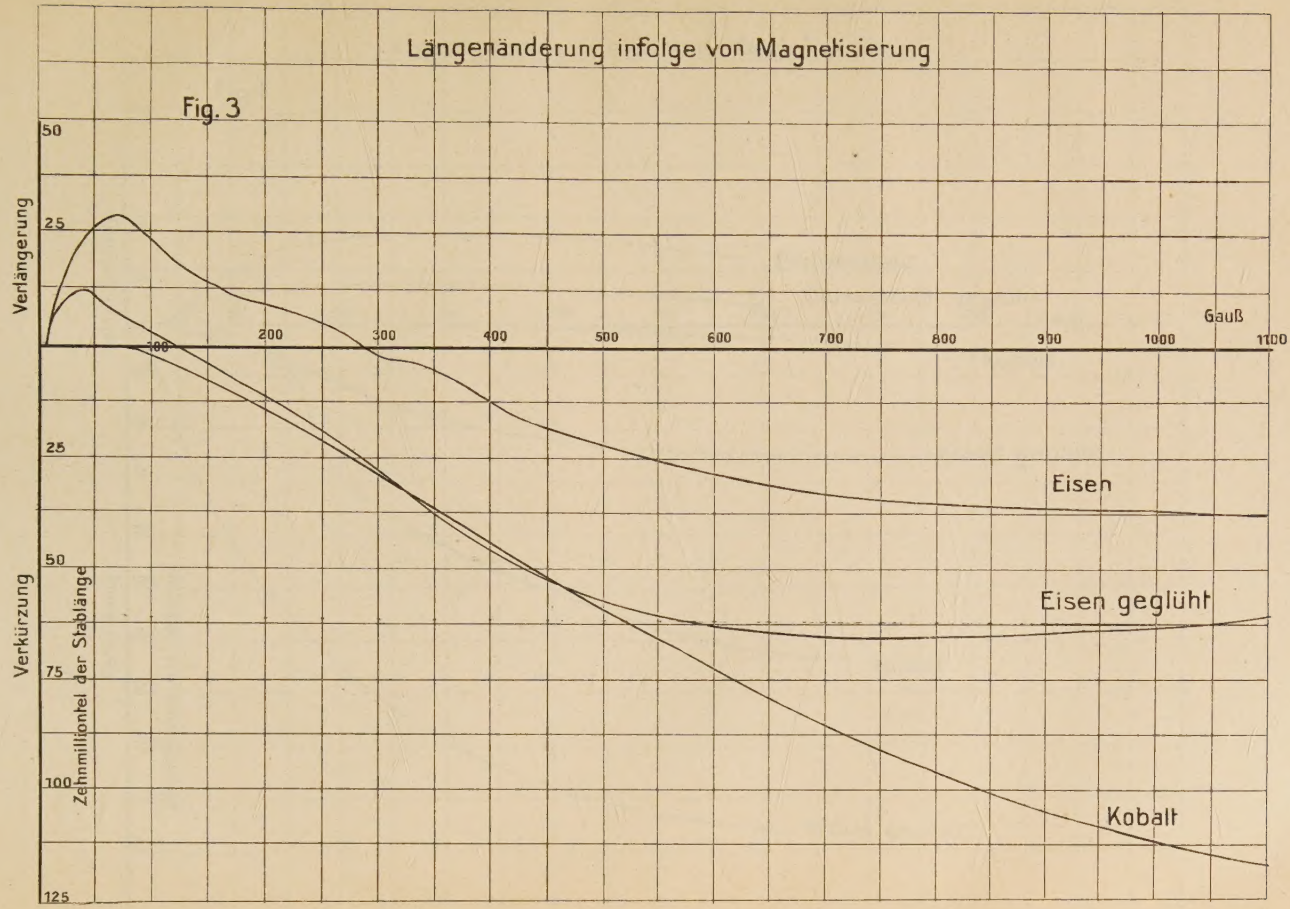
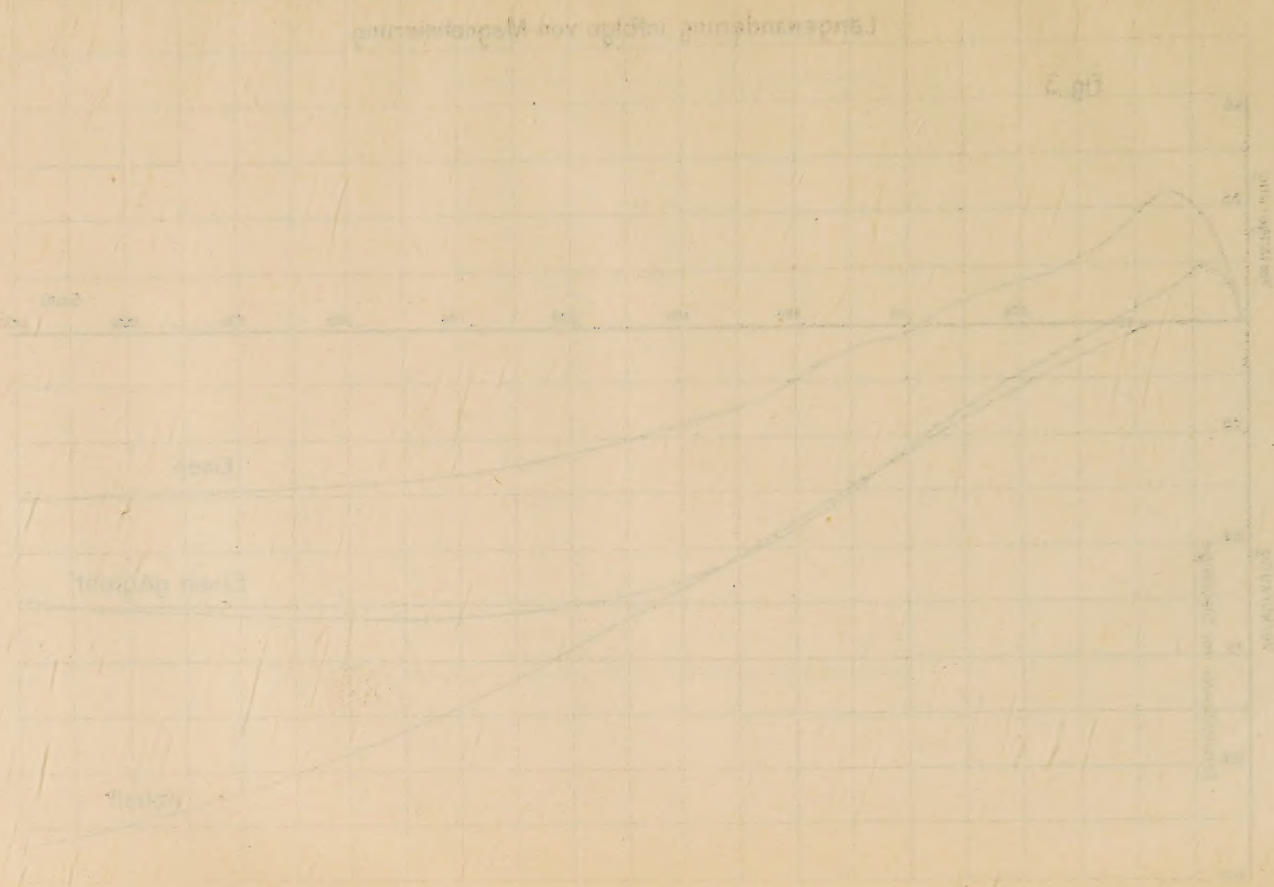
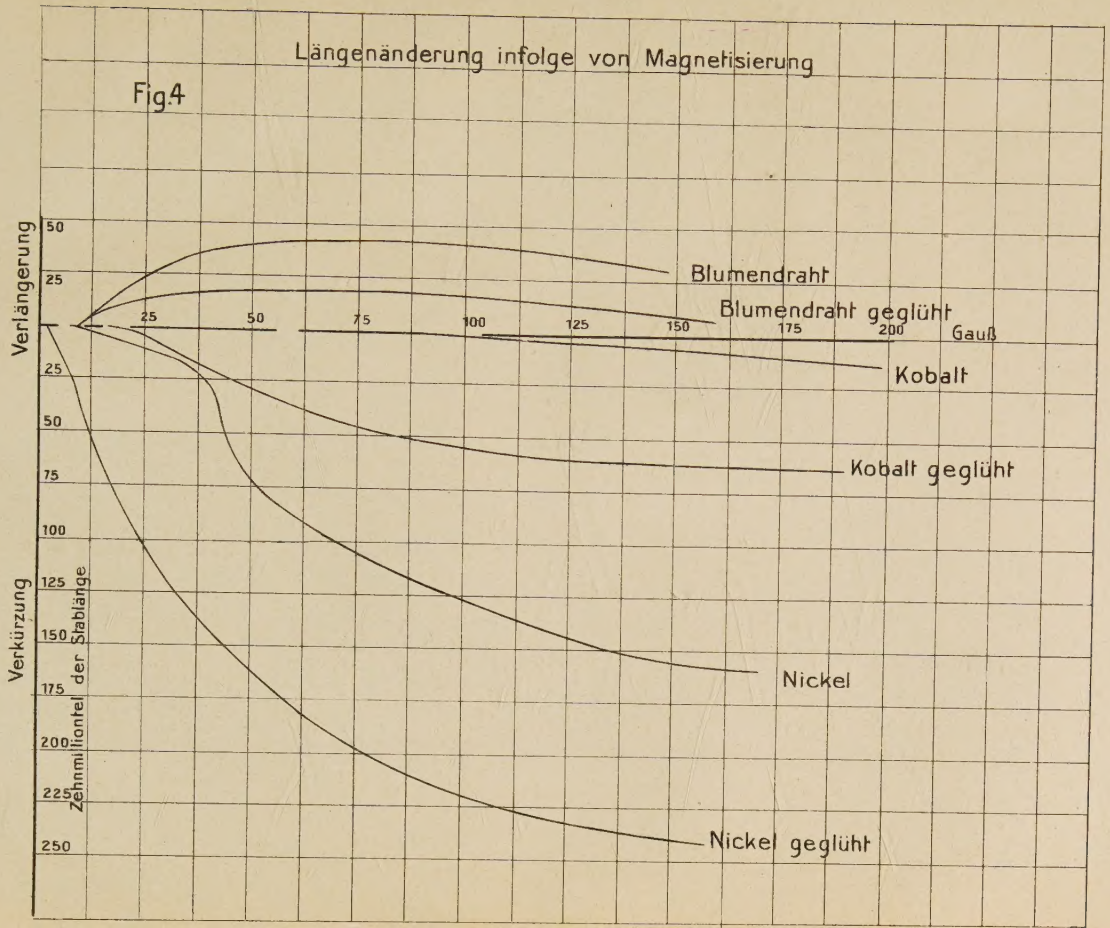
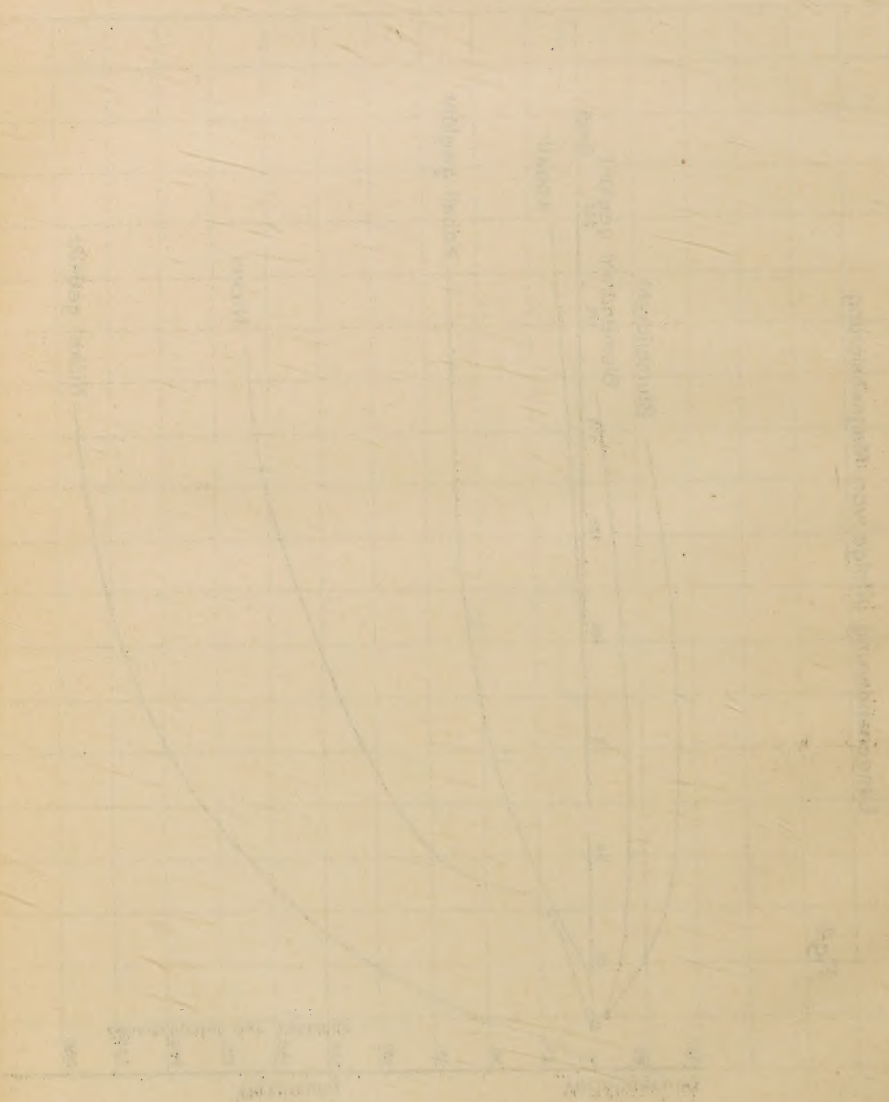


Fig.1


Längenänderung infolge von Magnetisierung
Fig. 3
Verlängerung
Verkürzung
Zehnmillionteil der Stablänge
50
25
25
50
75
100
125
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
1100
Gauß
Eisen
Eisen geglüht
Kobalt




Längenänderung infolge von Magnetisierung
Fig.4
Verlängerung
Verkürzung
Zehnmillionstel der Stablänge
50
25
25
50
75
100
125
150
175
200
225
250
25
50
75
100
125
150
175
200
Gauß
Blumendraht
Blumendraht geglüht
Kobalt
Kobalt geglüht
Nickel
Nickel geglüht